



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

CARLOS MORENO GARCIA

MAYO 2015

PAG.: i



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Título: Análisis Mecánico por Elementos
Finitos de una Antena UHF en la Órbita
de Marte**

Autor: Carlos Moreno García

Titulación: I.T.I.: Mecánica

Profesor: José Antonio Calvo

Fecha: 3 Junio 2015



INDICE

INDICE	II
INDICE DE FIGURAS	III
INDICE DE TABLAS	V
1.- OBJETIVO	1
2.- ESTADO DEL ARTE	2
3.- NOVEDADES	3
4.- PLANIFICACIÓN	4
4.1.- ACEPTACIÓN	4
4.2.- PREDISEÑO	4
4.3.- DESARROLLO DEL DISEÑO	5
4.4.- REVISIÓN DEL DISEÑO	5
4.5.- FABRICACIÓN	5
4.6.- VERIFICACIÓN Y MONTAJE	5
4.7.- MEDIDA Y TESTEO	6
4.8.- ENTREGA FINAL	6
5.- DESARROLLO	7
5.1.- DESCRIPCION DEL DISEÑO MECÁNICO	7
5.2.- MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS	15
5.3.- SISTEMA DE COODENADAS DE REFERENCIA	18
5.4.- PROPIEDADES	19
5.4.1.- MASA	19
5.4.2.- CENTRO DE GRAVEDAD	20
5.4.3.- MOMENTOS DE INERCIA	20
5.4.4.- DIMENSIONES MÁXIMAS	21
5.5.- ANÁLISIS MECÁNICO	22
5.5.1.- PROPÓSITO	22
5.5.2.- MARGENES DE SEGURIDAD	22
5.5.3.- ANÁLISIS DE LOS CASOS MECÁNICOS	24
5.6.- RESULTADOS	31
5.6.1.- MODAL	31
5.6.2.- SENO	34
5.6.3.- RANDOM	35
5.6.4.- CHOQUE	43
5.6.5.- ANALISIS DE TORNILLOS	51
5.6.6.- ANALISIS DE VENTILACIÓN	56
5.6.7.- ANALISIS CUASISTATICO	58
5.6.8.- ANALISIS TERMOELASTICO	61
6.- CONCLUSIONES	84
7.- DESARROLLOS FUTUROS	85
8.- BIBLIOGRAFÍA	86



INDICE DE FIGURAS

Figura 4.2-1.-Vista general del 3D en fase preliminar de la Antena UHF.....	4
Figura 4.7-1.-Vista de la antena en la fase de vibración.....	6
Figura 5.1-1.- Estructura completa del modelo 3D.	8
Figura 5.1-2.- Estructura del modelo 3D sin radomo.	8
Figura 5.1-3.- Estructura completa del modelo FEM.	9
Figura 5.1-4.- Detalle de la estructura del modelo FEM sin Radomo.....	10
Figura 5.1-5.- Radomo.	10
Figura 5.1-6.- Elemento radiante.....	11
Figura 5.1-7.- Balun	11
Figura 5.1-8.- Cuerpo principal.....	12
Figura 5.1-9.- Cubierta.	12
Figura 5.1-10- Piezas de Rexolita.	12
Figura 5.1-11.- Correas.	13
Figura 5.1-12.- Conductor interior 1.	13
Figura 5.1-13.- Conductor interior 2.	13
Figura 5.1-14.- Conductores interiores 3 y 4.	14
Figura 5.1-15.- Conectores.	14
Figura 5.3-1.- Sistema de coordenadas de la Antena.....	18
Figura 5.5-1.- Niveles de calificación de Random.	25
Figura 5.5-2.- Niveles de calificación de Seno.....	27
Figura 5.5-3.- Nivel de calificación de choque.....	28
Figura 5.5-4.-Perfil de despresurización.....	29
Figura 5.6-1.- Modo 1 a 188.1 Hz. Pandeo local del Balun en el eje Y.....	32
Figura 5.6-2.- Modo 2 a 198.16 Hz. Pandeo local del Balun en el eje Z.	33
Figura 5.6-3.- Modo 4 a 276.21 Hz. Modo global en dirección axial (eje X).....	33
Figura 5.6-4.- Máxima tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Random X (vista superior).	36
Figura 5.6-5.- Máxima tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Random X (vista inferior).	37
Figura 5.6-6.- Tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en la Cubierta en Random X.....	37
Figura 5.6-7.- Máxima tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Random Y (vista superior).	38
Figura 5.6-8.- Máxima tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Random Y (vista inferior).	38
Figura 5.6-9.- Tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Balun en Random Y.....	39
Figura 5.6-10.- Máxima tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Random Z (vista superior).....	39
Figura 5.6-11.- Máxima tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Random Z (vista inferior).....	40
Figura 5.6-12.- Tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Balun en Random Z.	40
Figura 5.6-13.- Numeración de los nodos de interfaz.	42
Figura 5.6-14.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque X (vista superior).....	45
Figura 5.6-15.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque X (vista inferior).....	45
Figura 5.6-16.- Tensión Von Mises (Pa) en Conductores interiores 3-4 en Choque X.....	46
Figura 5.6-17.- Tensión Von Mises (Pa) en pieza de Rexolita en Choque X.	46
Figura 5.6-18.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque Y (vista superior).....	47
Figura 5.6-19.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque Y (vista inferior).....	47
Figura 5.6-20.- Tensiones Von Mises (Pa) en Conductores Interiores 3-4 en Choque Y.....	48
Figura 5.6-21.- Tensiones Von Mises (Pa) en Piezas de Rexolita en Choque Y.	48
Figura 5.6-22.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque Z (vista superior).....	49
Figura 5.6-23.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque Z (vista inferior).....	49
Figura 5.6-24.- Tensión Von Mises (Pa) en Conductores Interiores 3-4 en Choque Z.....	50
Figura 5.6-25.- Tensiones Von Mises (Pa) en Piezas de Rexolita en Choque Z.....	50
Figura 5.6-26.-Variación de la presión-tiempo.....	57



Figura 5.6-27.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Cuasi-estático X (vista general).....	59
Figura 5.6-28.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Cuasi-estático X.....	60
Figura 5.6-29.- Antena UHF sobre el panel del satélite.....	61
Figura 5.6-30.- TE1. Distribución de temperaturas en el panel.....	65
Figura 5.6-31.- TE1. Distribución de temperaturas en el radomo.....	65
Figura 5.6-32.- TE1. Distribución de temperaturas en la antena.....	66
Figura 5.6-33.- TE2. Distribución de temperaturas en el panel.....	66
Figura 5.6-34.- TE2. Distribución de temperaturas en el radomo.....	67
Figura 5.6-35.- TE2. Distribución de temperaturas en la antena.....	67
Figura 5.6-36.- TE3. Distribución de temperaturas en el panel.....	68
Figura 5.6-37.- TE3. Distribución de temperaturas en el radomo.....	68
Figura 5.6-38.- TE3. Distribución de temperaturas en la antena.....	69
Figura 5.6-39.- TE4. Distribución de temperaturas en el panel.....	69
Figura 5.6-40.- TE4. Distribución de temperaturas en el radomo.....	70
Figura 5.6-41.- TE4. Distribución de temperaturas en la antena.....	70
Figura 5.6-42.- TE1-B. Distribución de temperaturas en el panel.....	71
Figura 5.6-43.- TE1-B. Distribución de temperaturas en el radomo.....	71
Figura 5.6-44.- TE1-B. Distribución de temperaturas en la antena.....	72
Figura 5.6-45.- Máxima Tensión Von Mises (MPa). Elementos placa sin radomo. Caso Termoelástico frío TE1-A.....	75
Figura 5.6-46.- Máxima tensión Von Mises (MPa). Elementos sólidos. Caso Termoelástico frío TE1-A.....	76
Figura 5.6-47.- Máxima tensión Von Mises (MPa). Radomo. Caso Termoelástico frío TE1-A.....	76
Figura 5.6-48.- Numeración de las uniones.....	77



INDICE DE TABLAS

Tabla 5.2-1.- Propiedades del Aluminio 7075-T73	16
Tabla 5.2-2.- Propiedades del Acero Inoxidable AISI 316.	16
Tabla 5.2-3.- Propiedades de la fibra de vidrio.	16
Tabla 5.2-4.- Propiedades Teflón (PTFE).....	16
Tabla 5.2-5.- Propiedades del Cobre-Berilio.	17
Tabla 5.4-1.-Masa de los componentes	19
Tabla 5.4-2.- Coordenadas del centro de gravedad.	20
Tabla 5.4-3.- Momentos de inercia.....	20
Tabla 5.4-4.- Dimensiones máximas	21
Tabla 5.5-1.- Factores de seguridad por diseño	22
Tabla 5.5-2.- Factores de carga de diseño.....	23
Tabla 5.5-3.- Niveles de calificación de Random.....	25
Tabla 5.5-4.- Niveles de calificación de Seno.....	27
Tabla 5.5-5.- Nivel de calificación de choque.	28
Tabla 5.5-6.- Factores de seguridad para los modos de fallo de los tornillos	29
Tabla 5.5-7.- Niveles para Cuasi-estático.....	30
Tabla 5.6-1.- Principales frecuencias propias y fracciones de masa efectivas.....	31
Tabla 5.6-2.- Valores de respuesta 3-grms de Random	34
Tabla 5.6-3.- Máximas Tensiones 3- σ Von Mises para Random	35
Tabla 5.6-4.- Máximas reacciones en los puntos de Interfaz.....	41
Tabla 5.6-5.- Máximas Tensiones Von Mises para Choque	43
Tabla 5.6-6.- Márgenes de seguridad para tornillos internos de M2.5 para los modos de fallo.	52
Tabla 5.6-7.- Márgenes de seguridad para tornillos internos de M3 para los modos de fallo.	53
Tabla 5.6-8.- Márgenes de seguridad para tornillos internos de M4 para los modos de fallo.	54
Tabla 5.6-9.- Márgenes de seguridad para tornillos de interfaz de M5 para los modos de fallo.	55
Tabla 5.6-10.- Diferencia de presión entre el interior del equipo y el ambiente.....	57
Tabla 5.6-11.- Máximas Tensiones Von Mises para Cuasi-estático	58
Tabla 5.6-12.- Descripción de los casos termoelásticos.....	63
Tabla 5.6-13.- Instantes analizados de los casos de carga transitorios.....	64
Tabla 5.6-14.- Tensiones máximas y márgenes de seguridad	73
Tabla 5.6-15.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE1.	78
Tabla 5.6-16.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE2.	78
Tabla 5.6-17.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE3.	78
Tabla 5.6-18.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE4.	79
Tabla 5.6-19.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE1-A.....	79
Tabla 5.6-20.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE1-B.....	79
Tabla 5.6-21.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE1-C.	80
Tabla 5.6-22.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE4-A.....	80



Tabla 5.6-23.- Mínimos márgenes de seguridad para tornillos de IF M5 de titanio. TE1-A.	82
Tabla 5.6-24.- Mínimos márgenes de seguridad para tornillos de la unión Cuerpo-Radomo M4 de acero. TE1-A.	83
6-1.-Dimensiones máximas.	84



1.-OBJETIVO

El proyecto desarrolla el diseño mecánico de una antena helicoidal en banda UHF que será parte de un satélite cuyo destino final será Marte.

Los principales objetivos de la misión son:

- Buscar trazas o evidencia de metano y otros gases atmosféricos que podrían manifestar signos de procesos biológicos o geológicos activos, es decir, buscar indicios de vida pasada en Marte
- Poner a prueba la tecnología necesaria para posteriores misiones europeas a Marte.

El proyecto se centrará en la antena encargada de las comunicaciones entre el orbitador y el módulo de descenso sobre la superficie de Marte

Este documento resume las pautas del diseño y los resultados del análisis mecánico de una antena en banda UHF sometida a un entorno mecánico especificado para soportar todas las cargas desde el despegue en La Tierra hasta su entrada en la atmósfera de Marte.

Para ello se ha modelado un modelo FEM (modelo elementos finitos) de la antena. Este modelo será utilizado para comprobar el comportamiento estructural y para demostrar la conformidad con respecto a los requisitos especificados.



2.-ESTADO DEL ARTE

Este proyecto trata sobre una antena en banda UHF de grandes dimensiones y geometría compleja, que irá montada en un orbitador cuyo destino final es una órbita en la atmósfera de Marte.

Tendrá que cumplir con los exigentes requerimientos operacionales, mecánicos y térmicos, sin degradar sus propiedades durante la duración de la misión.

Será la primera vez que se realice este tipo de misión, al menos en la historia de Europa.

El propósito de la antena, que irá en el orbitador, será comunicarse con el EDM (Modulo Entrada Descenso) que estará sobre la superficie de Marte.

La complejidad de este proyecto es elevada, ya que nos enfrentamos a un entorno desconocido, con especificaciones termo-mecánicas muy diferentes a lo estándar, requerimientos de masa y tamaño muy estrictos, y una estructura muy esbelta e inestable.

Por lo tanto, no tenemos ninguna herencia parecida en la que apoyarnos



3.-NOVEDADES

Las mayores novedades con respecto a otros proyectos del área parecidos son:

-Es un producto cuyo conocimiento es muy exclusivo, sólo está al alcance de la gente que está familiarizada con el reducido sector aeroespacial, y dentro de este sector, las antenas de tipo helicoidal son poco comunes. Dada su complejidad sólo se usan para programas muy específicos en las que no pueden ser sustituidas por antenas parche.

-Está sometido a unas cargas muy poco comunes ya que su destino final es Marte, un destino que nunca se ha alcanzado bajo el marco de misiones europeas. Si bien las cargas de despegue desde la Tierra son comunes a otros equipos, las dificultades residen en la fase de entrada en la atmósfera de Marte. El módulo de entrada protegido por un gran escudo térmico, usará el rozamiento con la atmósfera marciana para ir perdiendo velocidad. Esto supondrá un gran impacto mecánico y térmico muy poco común, ya que normalmente este tipo de impactos de reentrada en la atmósfera, suceden cuando los equipos han llegado al final de su vida operativa.

-La geometría helicoidal de la antena es muy novedosa a la par que complica el diseño mecánico mucho, tanto para conseguir los requerimientos de frecuencia como para cumplir en tensiones. También complica el diseño desde el punto de vista de la optimización del despiece para la fabricación y montaje.

4.-PLANIFICACIÓN

Este proyecto se va a centrar en analizar y presentar los resultados de la parte relativa al diseño mecánico de la antena UHF. Pero la complejidad del proyecto global es mucho mayor.

Las fases del diseño de la antena UHF de principio a fin serían:

4.1.-ACEPTACIÓN

Es el aprovisionamiento, lectura y evaluación de todas las especificaciones técnicas relativas al equipo, tanto de las especificaciones generales de la misión como las específicas para nuestra unidad. Hay que evaluar los posibles cumplimientos y/o desviaciones sobre los requerimientos eléctricos, mecánicos, térmicos, de calidad, de fabricación, de montaje y de entrega. Evaluar la viabilidad del proyecto en calendario, coste y prestaciones técnicas.

4.2.-PRELIMINAR

En esta fase se hace un primer esquema de la geometría, masa y dimensiones del equipo, en la que deben trabajar coordinados los responsables eléctricos, mecánicos y térmicos. Si fuese necesario dada la complejidad del equipo también se deben contrastar opiniones con los responsables de fabricación y montaje. En esta fase se detectan las principales dificultades del diseño en todas las áreas. En la figura 4.2-1 se puede ver la antena en la fase de pre-diseño

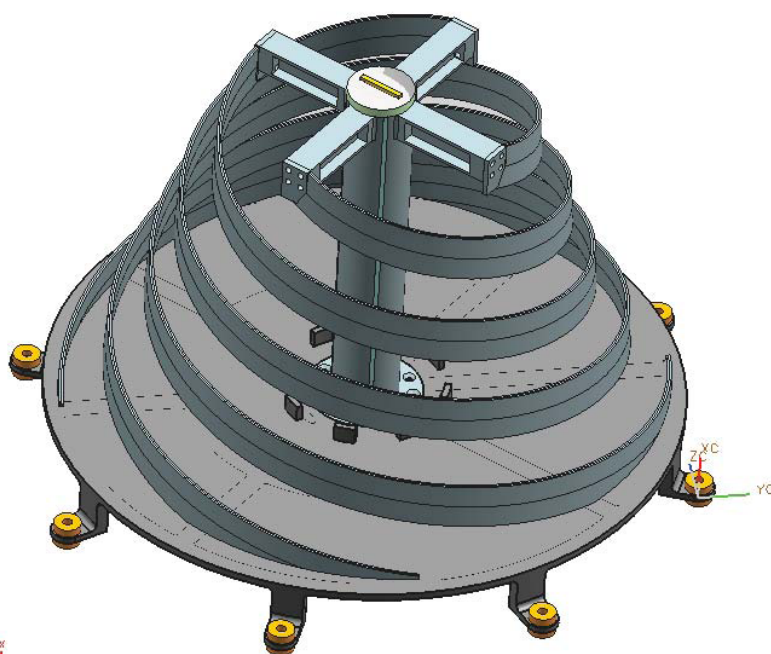


Figura 4.2-1.-Vista general del 3D en fase preliminar de la Antena UHF



4.3.-DESARROLLO DEL DISEÑO

Esta es la fase más importante y costosa del proyecto. En ella se llevan a cabo todos los análisis detallados, y habrá que optimizar o rediseñar cuantas veces sea necesario hasta cumplir con todos los parámetros eléctricos, mecánicos y térmicos requeridos.

En el caso de este equipo la interacción entre el responsable eléctrico y mecánico-térmico ha sido clave, ya que ha habido varios rediseños debidos a incumplimientos eléctricos, mecánicos y térmicos.

Lo más crítico desde el punto de vista mecánico fue conseguir el cumplimiento en frecuencia, debido a la inestabilidad de las hélices, y en masa, debido al peso extra que añadía el radomo, a su vez dimensionado por el exigente requerimiento de "aerobraking" a la entrada en la atmósfera de Marte.

4.4.-REVISIÓN DEL DISEÑO

Este es el punto crítico del diseño. Es cuando se expone el diseño y todos los resultados al cliente final, que decidirá si acepta el diseño tal cual esta o necesita optimizar, rediseñar, recalcular o hacer algún análisis extra.

Cuando el cliente este conforme con los análisis dará permiso para pasar a la siguiente fase, la fabricación del equipo

4.5.-FABRICACIÓN

Previo a la fabricación se han debido hacer los planos de fabricación de cada una de las piezas, en los que se deben controlar todas las cotas con tolerancias de 2 ó 3 decimales para reproducir con la máxima exactitud posible el delicado diseño eléctrico. Una vez están los planos se procede a la fabricación de las piezas con los materiales previamente seleccionados por el responsable mecánico, y cuyos permisibles tienen que ser mayor o igual que los considerados en los análisis.

4.6.-VERIFICACIÓN Y MONTAJE

Una vez fabricadas, todas las piezas se verifican. Primero dimensionalmente, si hay alguna cota fuera de tolerancia tendrá que ser juzgado por el responsable eléctrico y mecánico si vale la desviación, o si por el contrario hay que repetirla.

Después se hace un pre-montaje de todas las piezas para ver si hay algún problema de holguras o confluencias de las piezas. Cuando todo esta correcto, el equipo pasa a la fase de baños y pintura.

4.7.-MEDIDA Y TESTEO

Cuando el equipo está terminado por completo comienza la fase de medidas eléctricas y test. Los más importantes desde el punto de vista mecánico son las vibraciones de seno y random, y los ciclos térmicos. Se hacen medidas iniciales y finales antes de cada test para comprobar que la respuesta del equipo no ha variado debido a los diferentes ensayos. En la figura 4.7-1 se puede ver el equipo durante el test de vibración

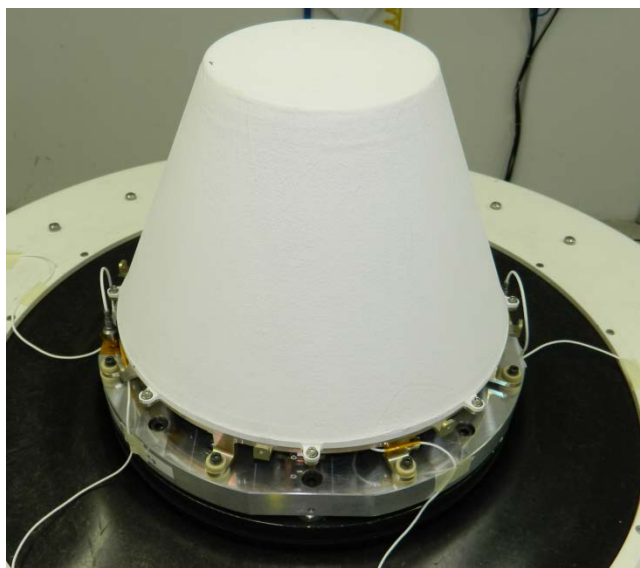


Figura 4.7-1.-Vista de la antena en la fase de vibración

4.8.-ENTREGA FINAL

Una vez terminados todos los ensayos se presentan los resultados al cliente, quien juzgará los resultados en sí, la correlación con los análisis, y el cumplimiento con las especificaciones. El equipo no será enviado hasta que el cliente no de su visto bueno, en alguna ocasión se puede pedir repetir ensayos



5.-DESARROLLO

En los siguientes apartados, se explican los componentes y materiales del equipo, las propiedades y los diferentes análisis a los que se va a someter a la antena

5.1.-DESCRIPCION DEL DISEÑO MECÁNICO

La Antena UHF comprende los siguientes componentes principales:

- Radomo
- Elemento radiante (hélice)
- Balun (columna central)
- Cuerpo principal
- Cubierta
- Piezas de Rexolita (x3)
- Soporte de la carga
- Correas (x4)
- Conductores interiores (x4)
- Conectores (x2)
- Soportes PTFE
- Arandelas térmicas (x16)
- Tornillería

En las figuras 5.1-1 y 5.1-2 se puede observar la antena con todos sus componentes integrados

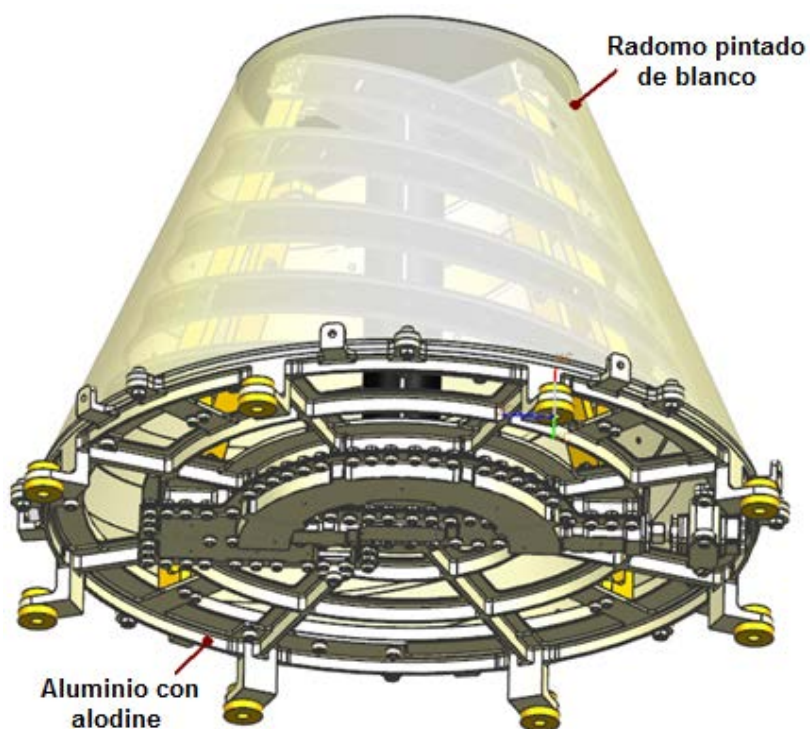


Figura 5.1-1.- Estructura completa del modelo 3D.

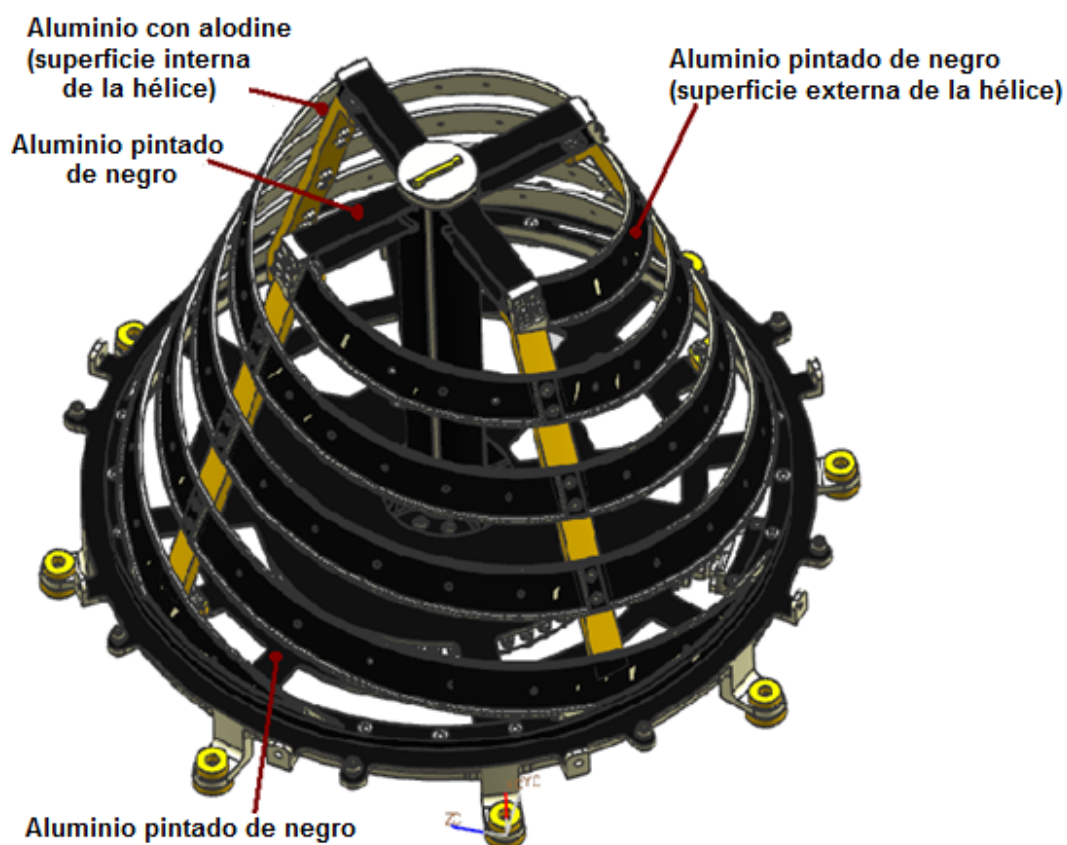


Figura 5.1-2.- Estructura del modelo 3D sin radomo.

Se ha desarrollado un FEM completo de todos los elementos ensamblados. El conjunto de elementos finitos se ha preparado utilizando I-DEAS NX y luego fue trasladado a FEMAP 11.1 como pre-procesador y post-procesador de resultados, y NX Nastran como procesador de resultados

El sistema de unidades usadas para definir el modelo es el sistema internacional (SI)

Se pueden observar en las figuras 5.1-3 y 5.1-4 una visión general del modelo FEM de la antena UHF:

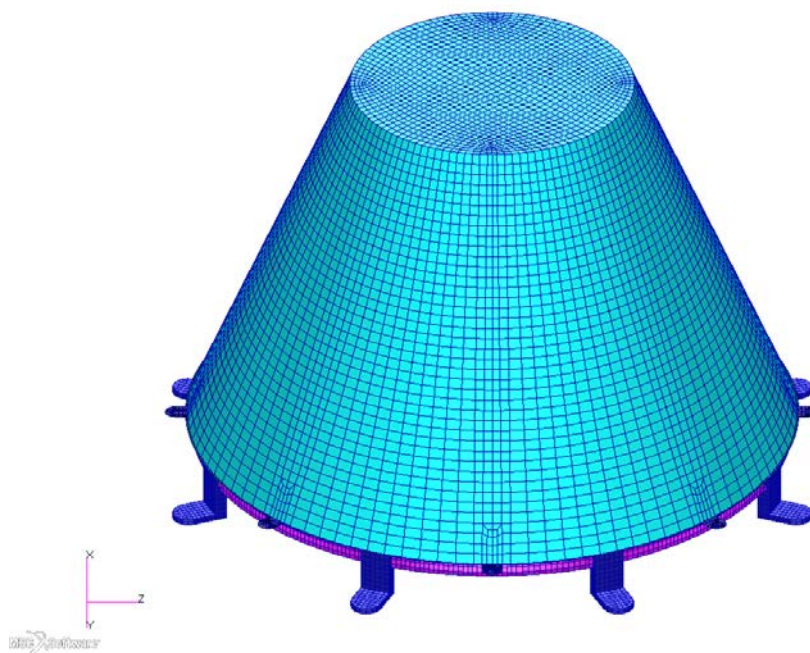


Figura 5.1-3.- Estructura completa del modelo FEM.

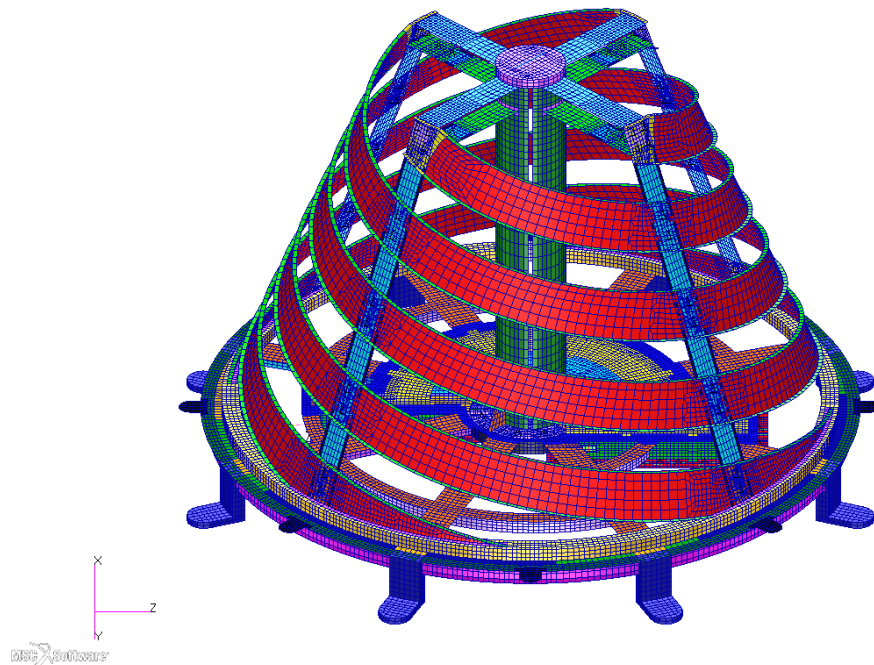


Figura 5.1-4.- Detalle de la estructura del modelo FEM sin Radomo.

La estructura FEM se simula teniendo en cuenta el comportamiento mecánico, con elementos que se asemejan lo más posible al modelo real. Por lo tanto, todas las piezas son simuladas con elementos placa y elementos sólidos, con las propiedades reales del material en cada caso. En las figuras 5.1-5 a 5.1-15, se pueden observar la comparación del FEM y el 3D de las diferentes piezas.

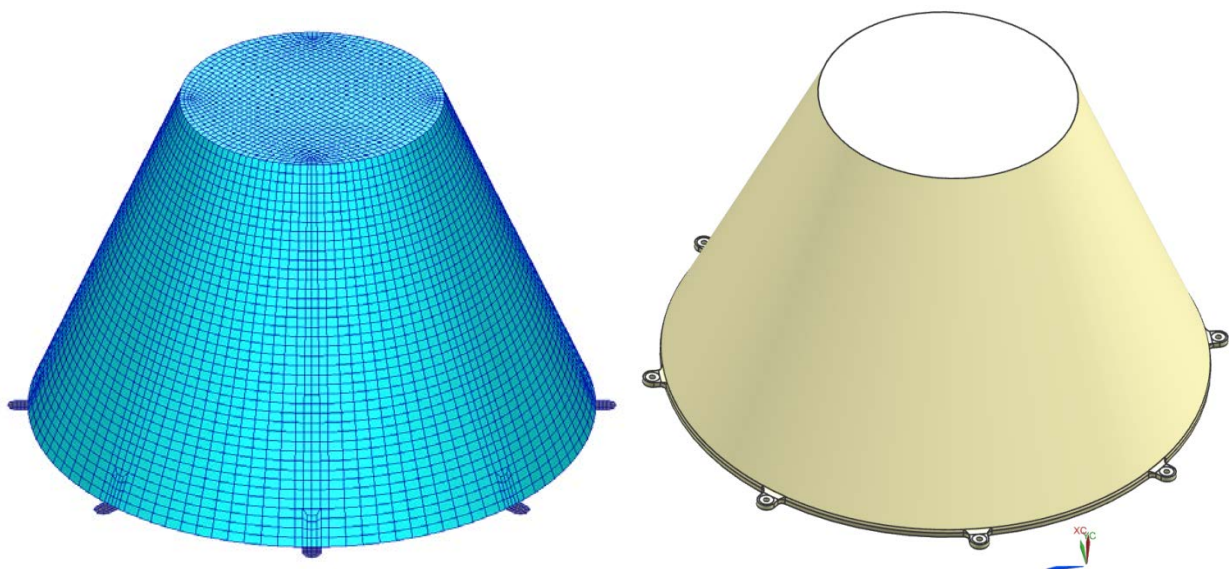


Figura 5.1-5.- Radomo.

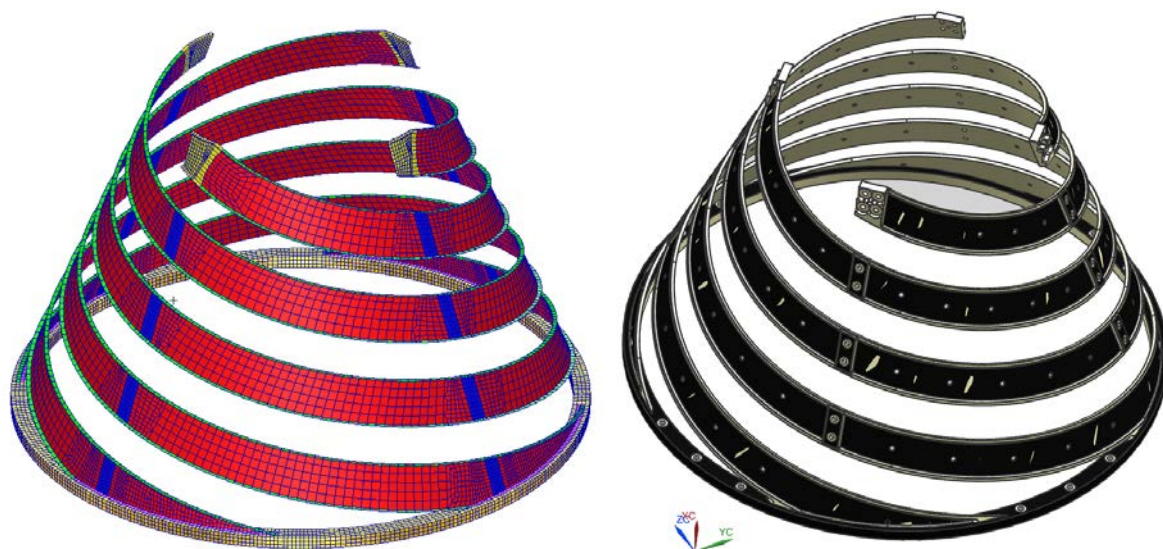


Figura 5.1-6.- Elemento radiante.

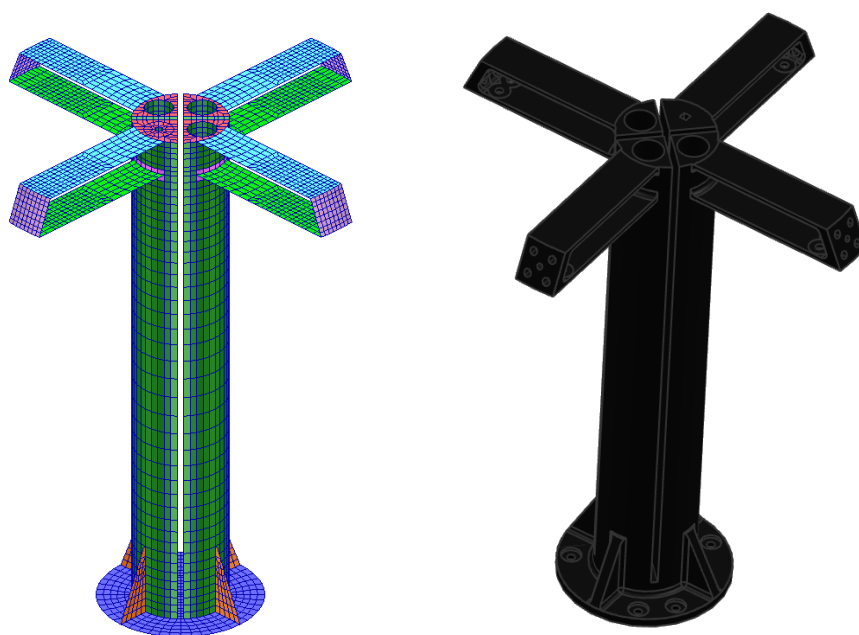
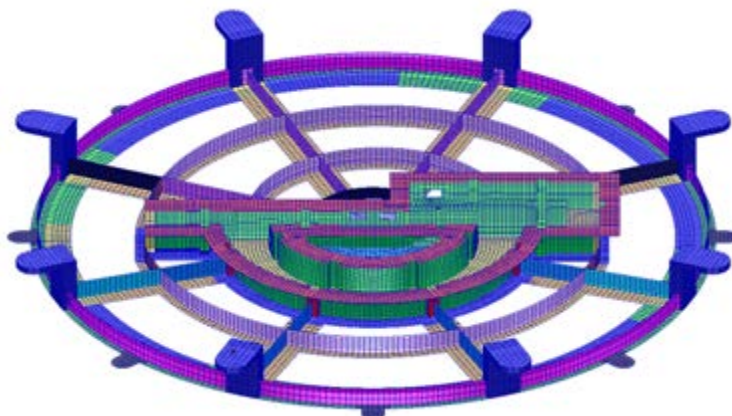


Figura 5.1-7.- Balun



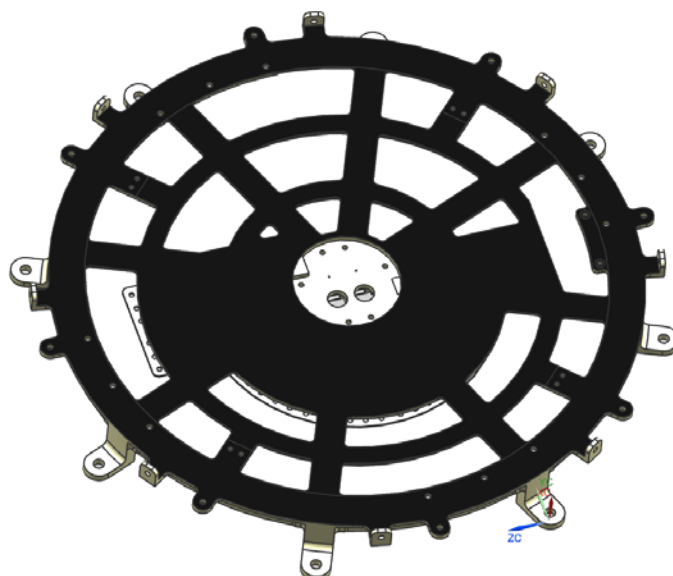


Figura 5.1-8.- Cuerpo principal.

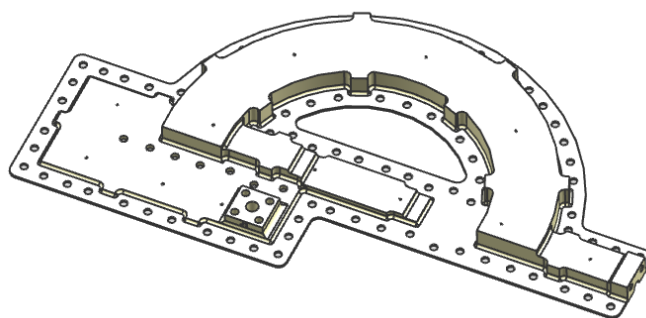
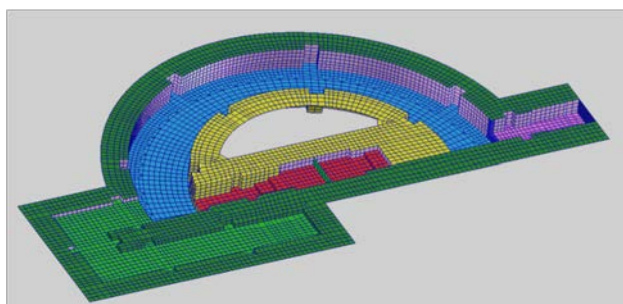


Figura 5.1-9.- Cubierta.

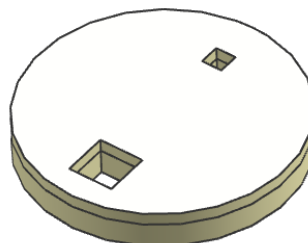
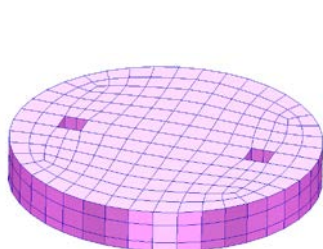


Figura 5.1-10- Piezas de Rexolita.



Figura 5.1-11.- Correas.

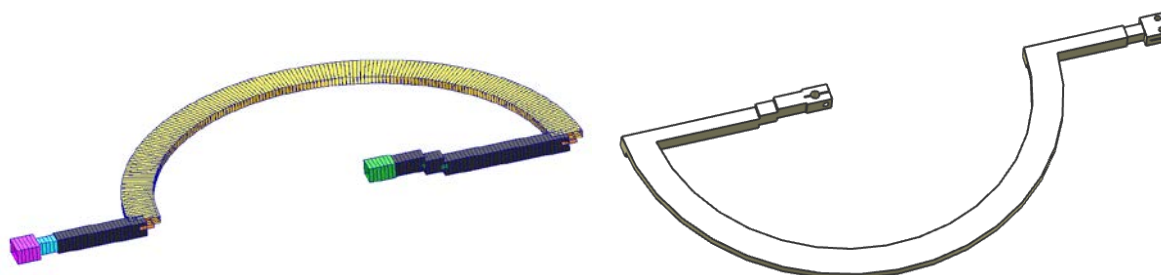


Figura 5.1-12.- Conductor interior 1.

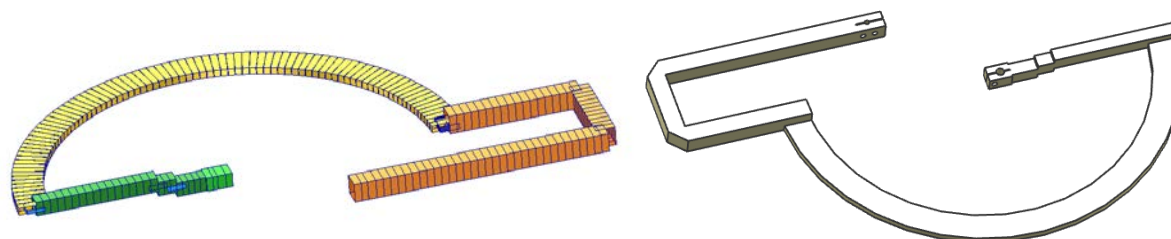


Figura 5.1-13.- Conductor interior 2.

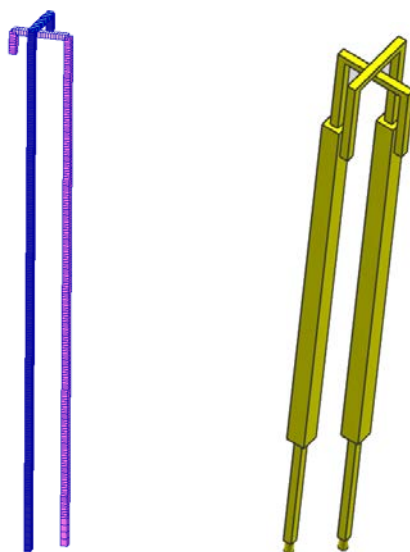


Figura 5.1-14.- Conductores interiores 3 y 4.

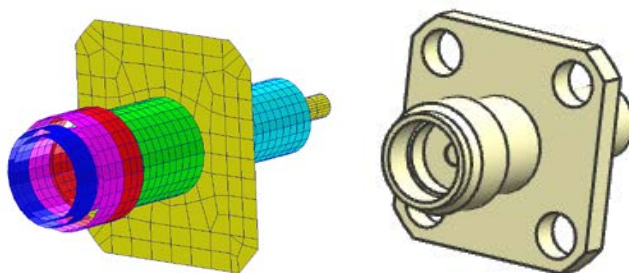


Figura 5.1-15.- Conectores.

Todas las uniones entre los diferentes componentes de la antena se realizan por medio de tornillos de acero inoxidable.



5.2.- MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS

Los materiales y recubrimientos empleados en la fabricación de la Antena UHF son los siguientes:

- Aluminio 7075-T73 para el Elemento radiante, Balun, Cuerpo principal, Cubierta, conductores interiores 1-2
- AISI 316/304 Acero Inoxidable para las uniones entre piezas.
- Permaglas ME 730 para las arandelas térmicas y correas
- Adhesivo Solithane S113/C113-300 como dispositivo de bloqueo redundante para los tornillos
- Recubrimiento de Alodine 1200S para todas las piezas de aluminio
- Pintura Blanca SG121FD aplicada sobre las superficies externas del Radomo.
- Pintura negra AZ306 aplicada sobre las superficies externas del Elemento Radiante, Cuerpo principal y Balun
- Cobre-Berilio para los conductores interiores 3-4 y conectores

Las propiedades mecánicas y físicas de los materiales principales se presentan en las tablas 5.2-1 a 5.2-5:

Tabla 5.2-1.- Propiedades del Aluminio 7075-T73

Material	Aluminio 7075-T73
Componente	Elemento radiante, Balun, Cuerpo principal, Cubierta, Conductores interiores
Densidad (ρ)	2800 kg/m ³
Modulo de Young (E)	71.7 GPa
Coef. Poisson (ν_{12})	0.33
Resistencia a Deformación(σ_y)	303.4 MPa
Resistencia a Rotura (σ_u)	386.1 MPa
FUENTE	DA-6

Tabla 5.2-2.- Propiedades del Acero Inoxidable AISI 316.

Material	Acero Inox AISI-316
Componente	Tornillos A4-80
Densidad (ρ)	7920 kg/m ³
Modulo de Young (E)	210 GPa
Coef. Poisson (ν_{12})	0.29
Resistencia a Deformación(σ_y)	600 MPa
Resistencia a Rotura (σ_u)	800 MPa
FUENTE	DA-6

Tabla 5.2-3.- Propiedades de la fibra de vidrio.

Material	Fibra de vidrio
Componente	Radomo
Densidad (ρ)	1850 kg/m ³
Modulo de Young (E)	20 GPa
Coef. Poisson (ν_{12})	0.3
Tensión máxima (σ_u)	350 MPa
FUENTE	DA-7

Tabla 5.2-4.- Propiedades Teflón (PTFE).

Material	Teflón (PTFE)
Componente	Soportes PTFE
Densidad (ρ)	2150 kg/m ³
Modulo de Young (E)	0.42 GPa
Coef. Poisson (ν_{12})	0.46
Tensión máxima (σ_u)	25 MPa
FUENTE	DA-7



Tabla 5.2-5.- Propiedades del Cobre-Berilio.

Material	CuBe
Componente	Conductores interiores 3-4, conector
Densidad (ρ)	8250 kg/m ³
Modulo de Young (E)	128 GPa
Coef. Poisson (ν_{12})	0.27
Resistencia a Deformación(σ_y)	1258 MPa
Resistencia a Rotura (σ_u)	1329 MPa
FUENTE	DA-6

5.3.- SISTEMA DE COODENADAS DE REFERENCIA

El origen de coordenadas del equipo está situado en el centro del agujero de referencia, en el plano de interfaz

Los planos del sistema de referencia ortogonal de la antena son paralelos a los del satélite, siendo el plano YZ (plano de montaje) paralelo al panel de satélite, y el eje X paralelo con el eje de la antena

El sistema de coordenadas de referencia se muestra en la figura 5.3-1:

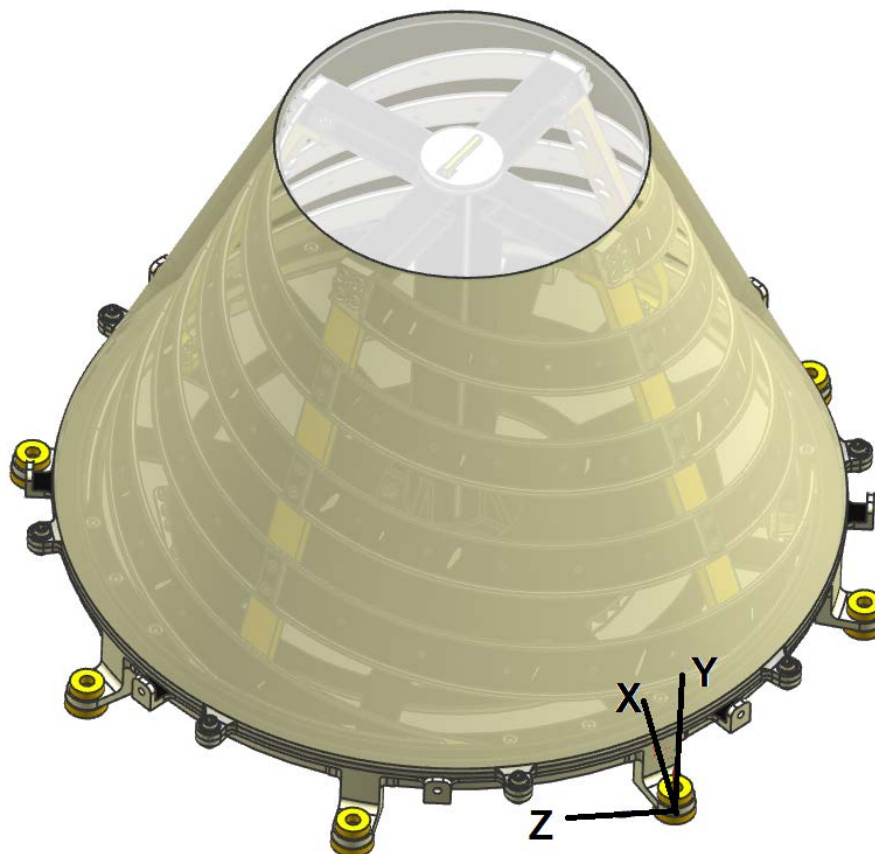


Figura 5.3-1.- Sistema de coordenadas de la Antena.



5.4.- PROPIEDADES

Las propiedades físicas (masa, centro de gravedad y momentos de inercia) de la Antena UHF se calculan en los sistemas de coordenadas definidos en el apartado anterior.

5.4.1.- MASA

La masa de la antena se presenta en la tabla 5.4-1. En el valor de masa estimado de la antena también se incluye la masa correspondiente a las superficies pintadas.

Tabla 5.4-1.-Masa de los componentes

Componentes	Masa del FEM (g)
Radomo	731.0
Elemento Radiante	333.5
Balun	249.7
Cuerpo principal	484.0
Cubierta	45.9
Piezas de Rexolita	54.8
Correas	106.5
Soporte de la carga	5.2
Conductores interiores	58.1
Conectores	7.3
Soportes PTFE	21.8
Tornillería	135.2
Carga	13.0
TOTAL	2246.0

- La masa máxima calculada para el FEM es 2246.0 g. Este valor incluye una masa no estructural extra del 8% (5% para el Radomo) y cumple con el requerimiento de masa de 2300g

5.4.2.- CENTRO DE GRAVEDAD

El centro de gravedad del modelo CAD de la antena con respecto al Sistema de referencia se indica en la tabla 5.4-2:

Tabla 5.4-2.- Coordenadas del centro de gravedad.

Ejes	Centro de gravedad (mm)
X	82.08
Y	146.48
Z	60.85

5.4.3.- MOMENTOS DE INERCIA

Los momentos de inercia del modelo CAD de la antena con respecto al Sistema de referencia se indican en la tabla 5.4-3:

Tabla 5.4-3.- Momentos de inercia.

	Momentos de inercia (Kg mm ²)
I _{xx}	22304
I _{yy}	20886
I _{zz}	19795



5.4.4.- DIMENSIONES MÁXIMAS

Las dimensiones máximas de la antena con respecto al Sistema de referencia se indican en la tabla 5.4-4:

Tabla 5.4-4.- Dimensiones máximas

Dimensiones máximas	
Planta	Ø338 mm ²
Altura	216.0 mm

- Las dimensiones máximas de la antena cumplen con el requerimiento de volumen máximo de Ø350 x 220 mm



5.5.- ANÁLISIS MECÁNICO

5.5.1.- PROPÓSITO

El propósito del análisis es mecánico es predecir y calcular el comportamiento estructural de la antena bajo el entorno mecánico especificado, y demostrar el cumplimiento con respecto a los requisitos especificados.

5.5.2.- MARGENES DE SEGURIDAD

La filosofía seguida para el factor de carga definida en el [DA-2](#) es la siguiente

$$DL = LL \times FS$$

Dónde:

DL = Carga de diseño

LL = Límite de vuelo de carga (cargas de aceptación)

FS = Factor de seguridad

Los Factores de seguridad definidos en [DA-3](#) se presentan en la tabla 5.5-1:

Tabla 5.5-1.- Factores de seguridad por diseño

Factores de seguridad para diseño		
Análisis	Deformación	Rotura
Estático	1.1	1.25
Seno	1.1	1.25
Random	1.1	1.25
Choque	1.1	1.25
Termoelastico	1.1	1.25



Los márgenes de seguridad serán calculados de la siguiente manera:

$$MS = \frac{\text{carga} / \text{tensión}}{DL} - 1$$

Dónde:

Carga/tensión= es la resistencia a la deformación o rotura del material

DL= Carga de diseño

Todos los márgenes de seguridad deberán ser positivos.

Además de los márgenes de seguridad típicos anteriores, dado lo novedoso del proyecto, se aplicará un margen extra a todos los análisis de Random, Seno, Choque y Termoelástico para cubrir las incertidumbres de la misión.

En la tabla 5.5-2 se puede ver el Factor de Carga de Diseño (FCD) especificado para cada caso:

Tabla 5.5-2.- Factores de carga de diseño

Factores de carga de diseño	
Análisis	FCD
Estático	1.2
Seno	1.2
Random	1.2
Termoelastico	1.5



5.5.3.- ANÁLISIS DE LOS CASOS MECÁNICOS

5.5.3.1.- Modal

La antena debe ser diseñada para no tener frecuencias de resonancia por debajo de 100 Hz en ninguna de las direcciones de excitación del equipo.

Se realizará un análisis modal para obtener las frecuencias propias, fracciones de masa eficaces y los principales modos propios.

5.5.3.2.- Random

Los niveles de Random aplicables según [DA-1](#) para la antena se pueden ver en la tabla 5.5-3 y la figura 5.5-1 :

Tabla 5.5-3.- Niveles de calificación de Random.

Fuera del plano (\perp)			
	Frecuencia (Hz)	Nivel (g ² /Hz)	Pendiente (dB/oct.)
	20	0.02	
	70	0.12	4.29
	400	0.12	0.00
	2000	0.006	-5.60
Nivel total: 9.20 g RMS			
En el plano (\parallel)			
	Frecuencia (Hz)	Nivel (g ² /Hz)	Pendiente (dB/oct.)
	20	0.01	
	80	0.04	3.01
	350	0.04	0.00
	2000	0.007	-3.01
Nivel total: 6.06 g RMS			

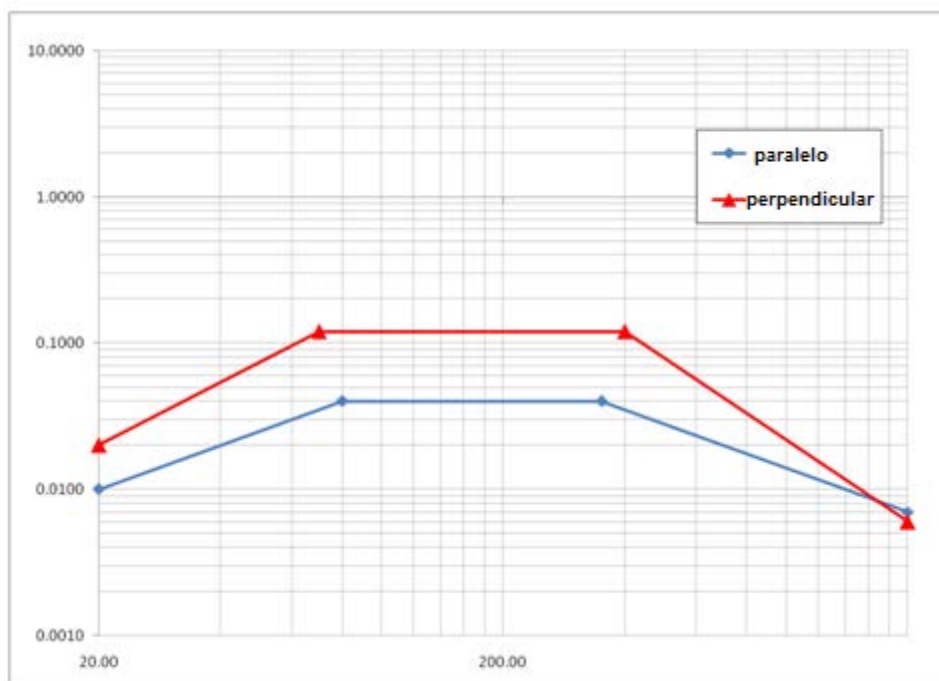


Figura 5.5-1.- Niveles de calificación de Random.

El peor caso de tensiones 3- σ Von Mises y fuerzas se obtendrá de la siguiente manera:

- Para cubrir la condición más extrema durante el test de Random, se utiliza un criterio de 3-sigma. Por lo tanto, la entrada de nivel de cualificación de Random (g^2/Hz) se multiplica por un factor de 9 en el análisis (el nivel general g-rms se multiplica por un factor de 3)
- Nastran da los valores g-RMS σ_X , σ_Y , y τ_{XY} .
- Se tiene en cuenta la ecuación de von Mises para un elemento placa bidimensional:

$$\sigma_{\text{VONMISES}} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 - \sigma_X \sigma_Y + 3\tau_{XY}^2}$$

El rango de frecuencia de los análisis cubre hasta 2.500 Hz. Se utiliza un coeficiente de amortiguamiento crítico de 0.005 ($\xi = 0,5\%$), típico para este tipo de antenas.

5.5.3.3.- Seno

La antena debe estar diseñada para soportar los niveles de calificación de seno especificado en [DA-1](#) que se muestran en la tabla 5.5-4 y figura 5.5-2:

Tabla 5.5-4.- Niveles de calificación de Seno.

En el plano (//)		
	Frecuencia (Hz)	Nivel (g)
	5	1
	20	10
	50	10
	55	15
	75	15
	80	10
	100	10
Fuera del plano (\perp)		
	Frecuencia (Hz)	Nivel (g)
	5	1
	20	10
	50	10
	55	20
	75	20
	80	10
	100	10

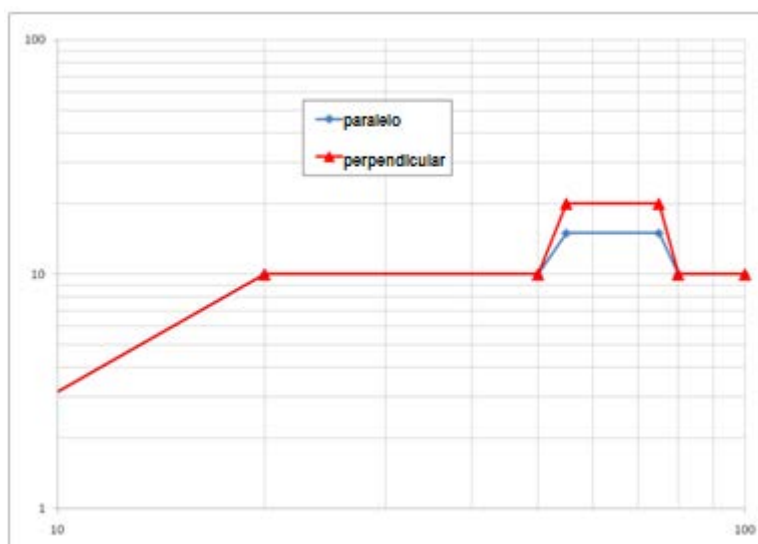


Figura 5.5-2.- Niveles de calificación de Seno.

5.5.3.4.-Choque

La antena debe estar diseñada para soportar el nivel de impacto de calificación estipulado en [DA-2](#) que se muestra en la tabla 5.5-5 y figura 5.5-3

Para analizar el choque se utilizará el criterio SRS (Shock Response Spectrum) típicamente usado en la industria aeroespacial

Tabla 5.5-5.- Nivel de calificación de choque.

Ejes	Frecuencia (Hz)	Nivel (g)
	100	30
	750	1100
	10000	1100

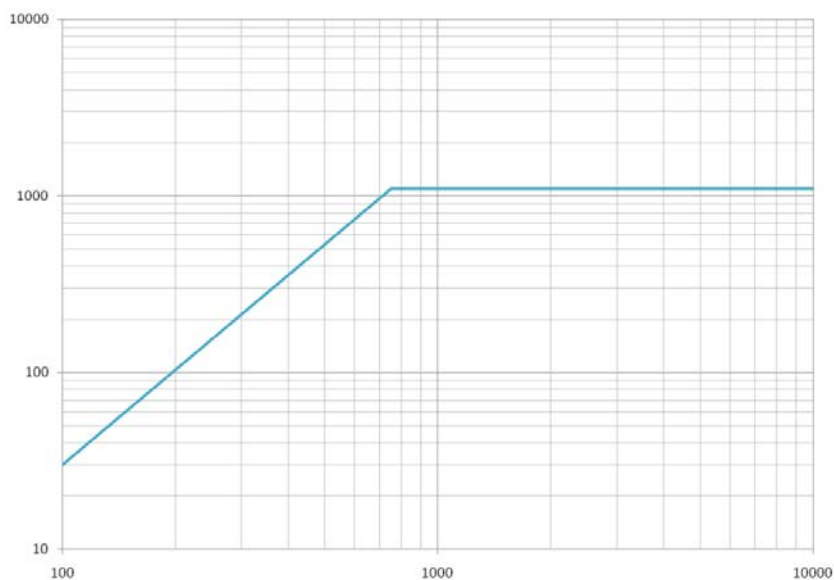


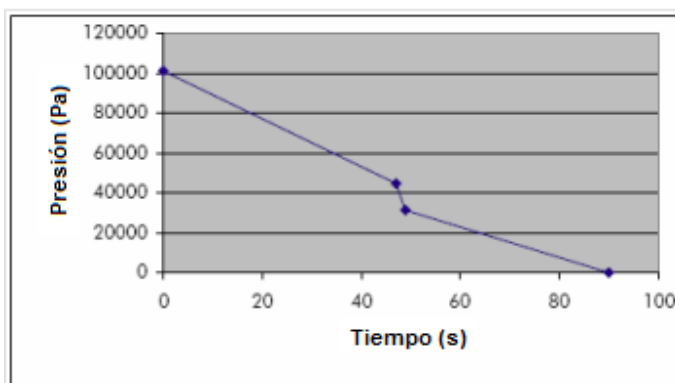
Figura 5.5-3.- Nivel de calificación de choque.

5.5.3.5.- Ventilación

El propósito del análisis de ventilación es el de garantizar la adecuada evacuación del aire atrapado en el interior de la antena durante la fase de lanzamiento.

La antena será diseñada para soportar las fuerzas experimentadas durante la despresurización producida en la etapa de lanzamiento, sin sufrir degradación en su rendimiento.

Se ha utilizado el perfil típico de despresurización para lanzadores que puede verse en la figura 5.5.4



Tiempo [s]	Presión [Pa]	Gradiente [Pa/s]
0	101000	0
47	45000	1191.5
49	31220	6890
90	0	346.9

Figura 5.5-4.-Perfil de despresurización

5.5.3.6.- Tornillos

La capacidad de resistencia de los tornillos de la antena será analizada para todos los casos críticos.

Los factores de seguridad aplicados en los modos de fallo de tornillos analizados, se pueden ver en la tabla 5.5-6:

Tabla 5.5-6.- Factores de seguridad para los modos de fallo de los tornillos

Deslizamiento		Separación		Fallo de tornillos	
				Factor de seguridad para deformación	1.1
				Factor de seguridad para rotura	1.25

5.5.3.7.- Cuasi-estático

La antena debe estar diseñada para soportar el nivel de calificación Cuasi-estático estipulado en [DA-1](#) que se muestra en la tabla 5.5-7:

Tabla 5.5-7.- Niveles para Cuasi-estático

Ejes	Nivel (g)
X (\perp)	20
Y,Z (\parallel)	15

5.5.3.8.- Termoelástico

El objetivo del análisis termoelástico de la antena UHF es comprobar las fuerzas que aparecerán en la interfaz de los tornillos de M5 que unen la antena al panel del Satélite, y las tensiones máximas obtenidas en las diferentes partes de la antena. Adicionalmente, y con el fin de estudiar la influencia de la diferente expansión térmica entre el radomo y la antena en sí, las fuerzas que pasan a través de los tornillos de M3 que sirven para unir el radomo al cuerpo principal también se comprobarán.

5.6.- RESULTADOS

En este apartado se detallan todos los resultados para los diferentes tipos de análisis y los diferentes casos analizados

5.6.1.- MODAL

El objetivo del análisis modal es evaluar la rigidez de la antena, las frecuencias a la que se producen sus modos propios, y la masa que mueve cada modo. Según los resultados se diseña la estructura de la antena. Se rigidizará si se necesita subir la frecuencia para esquivar los mayores niveles de carga, o se hará más flexible para aliviar las altas tensiones resultantes

5.6.1.1.- Frecuencias propias, masa efectiva y modos

Las frecuencias propias de la antena y las fracciones de masa efectiva de los principales modos del equipo (masa efectiva superior a 5%), así como el porcentaje de la masa total, se muestran en la tabla 5.6-1.

Tabla 5.6-1.- Principales frecuencias propias y fracciones de masa efectivas.

Modo	Frecuencia (Hz)	X	Y	Z
1	188.10	0.03%	20.69%	0.01%
2	198.16	0.04%	0.01%	21.21%
3	276.21	36.90%	0.01%	0.01%
9	397.97	0.00%	22.11%	0.18%
TOTAL (hasta 40 modos)		92.78%	96.71%	96.75%

Los principales modos de antena se muestran en las figuras 5.6-1 a 5.6-3:

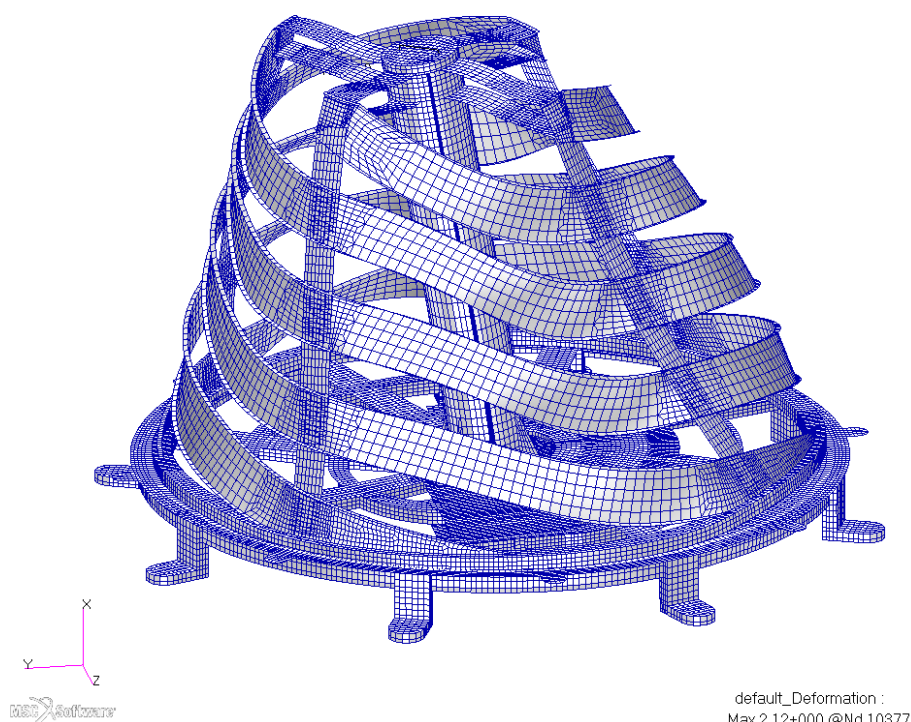


Figura 5.6-1.- Modo 1 a 188.1 Hz. Pandeo local del Balun en el eje Y.

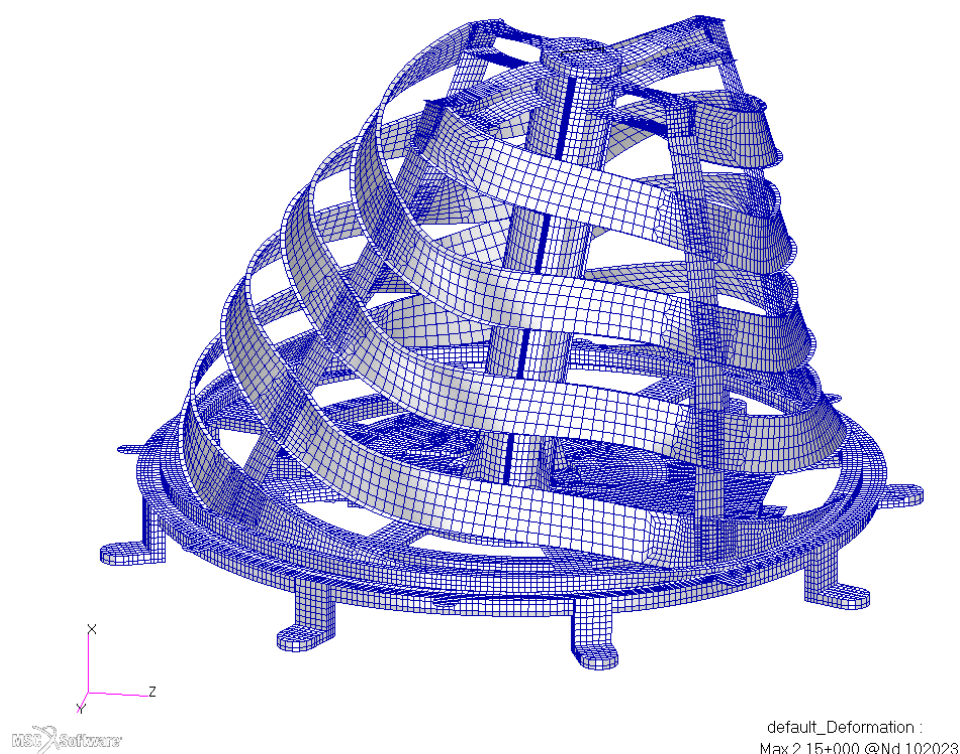


Figura 5.6-2.- Modo 2 a 198.16 Hz. Pandeo local del Balun en el eje Z.

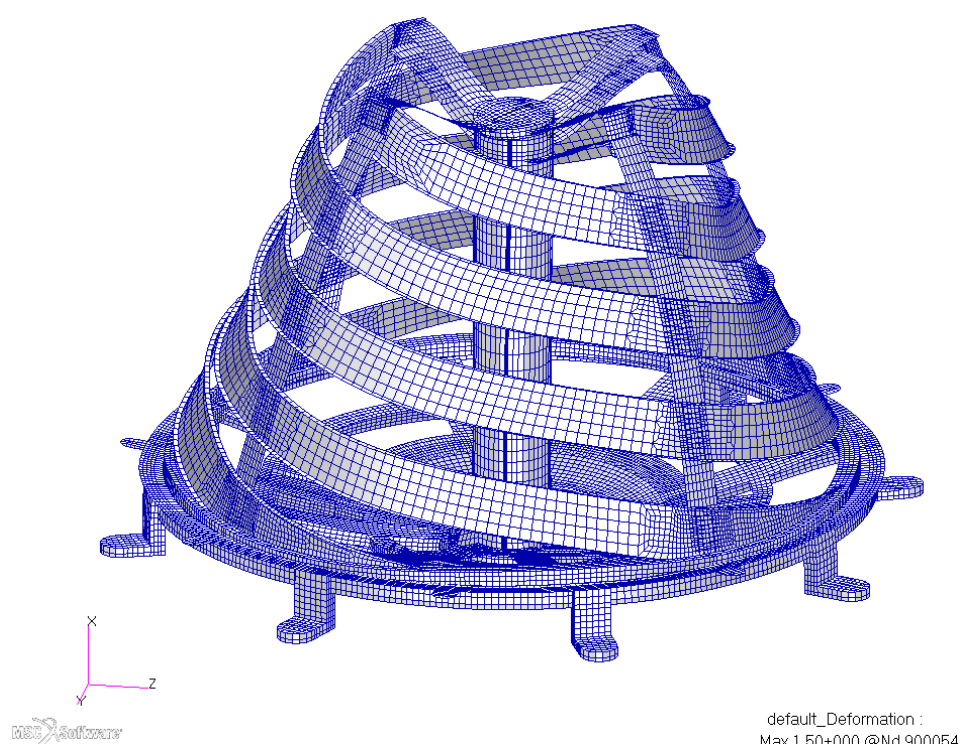


Figura 5.6-3.- Modo 4 a 276.21 Hz. Modo global en dirección axial (eje X).

5.6.2.- SENO

Las fuerzas de reacción en el nodo de la masa gorda se han calculado para los tres conjuntos de carga Random. Con la masa total de la antena, se han determinado los valores de respuesta 3-grms correspondiente.

Todas las respuestas son más altas que los niveles de seno especificados (20g) como muestra la tabla 5.6-2:

Tabla 5.6-2.- Valores de respuesta 3-grms de Random

Eje	3 grms-x	3 grms-y	3 grms-z
Random X	116.295	4.422	6.407
Random Y	3.096	55.366	8.349
Random Z	3.798	8.349	48.586

La frecuencia de excitación del seno está definida hasta 100 Hz y por lo tanto ninguna frecuencia natural de la antena (1^{a} frecuencia=188,1 Hz) será excitada por las cargas de random.

Teniendo en cuenta estos hechos, las tensiones y las fuerzas previstas en la antena debidas al seno serán muy inferiores a las obtenidas en el Random. Por lo tanto no es necesario realizar un análisis sinusoidal dedicado, ya que sus resultados los cubre el Random

5.6.3.- RANDOM

5.6.3.1.- Tensiones máximas

La tabla 5.6-3 muestra las Tensiones $3\text{-}\sigma$ de von Mises y los márgenes de seguridad obtenidos en los diferentes componentes de la antena para los tres conjuntos de carga Random:

Tabla 5.6-3.- Máximas Tensiones $3\text{-}\sigma$ Von Mises para Random

Conjunto de carga	Componente	Material	σ_Y [MPa]	σ_U [MPa]	$3\text{-}\sigma_{VM}$ [MPa]	$3\text{-}\sigma_{VM}$ FCD [MPa]	MSD	MSR
	Radomo	Fibra de vidrio	-	350	79.1	94.9	-	1.95
	Elemento radiante	Alu-7075-T73	303	386	99.6	119.5	1.30	1.58
	Balun	Alu-7075-T73	303	386	163	195.6	0.41	0.58
	Cuerpo principal	Alu-7075-T73	303	386	195	234.0	0.18	0.32
	Cubierta	Alu-7075-T73	303	386	207	248.4	0.11	0.24
	Soporte de la carga	Alu-7075-T73	303	386	57.5	69.0	2.99	3.48
	Correas	Permaglas	-	250	17.1	20.5	-	> 5
	Conductores interiores 1-2	Alu-7075-T73	303	386	88.4	106.1	1.60	1.91
	Conductores interiores 3-4	CuBe	1258	1329	180	216.0	4.29	3.92
	Conectores	CuBe	1258	1329	120	144.0	> 5	> 5
	Soportes PTFE	PTFE	-	25	0.64	0.8	-	> 5
	Radomo	Fibra de vidrio	-	350	62.3	74.8	-	2.75
	Elemento radiante	Alu-7075-T73	303	386	102	122.4	1.25	1.52
	Balun	Alu-7075-T73	303	386	180	216.0	0.28	0.43
	Cuerpo principal	Alu-7075-T73	303	386	99.9	119.9	1.30	1.58
	Cubierta	Alu-7075-T73	303	386	87.3	104.8	1.63	1.95
	Soporte de la carga	Alu-7075-T73	303	386	16.5	19.8	> 5	> 5
	Correas	Permaglas	-	250	18.5	22.2	-	> 5
	Conductores interiores 1-2	Alu-7075-T73	303	386	35	42.0	> 5	> 5
	Conductores interiores 3-4	CuBe	1258	1329	62.7	75.2	> 5	> 5
	Conectores	CuBe	1258	1329	33	39.6	> 5	> 5
	Soportes PTFE	PTFE	-	25	0.11	0.1	-	> 5
	Radomo	Fibra de vidrio	-	350	56.9	68.3	-	3.10
	Elemento radiante	Alu-7075-T73	303	386	96.8	116.2	1.37	1.66
	Balun	Alu-7075-T73	303	386	172	206.4	0.33	0.50
	Cuerpo principal	Alu-7075-T73	303	386	104	124.8	1.21	1.47
	Cubierta	Alu-7075-T73	303	386	73.9	88.7	2.11	2.48
	Soporte de la carga	Alu-7075-T73	303	386	58	69.6	2.96	3.44
	Correas	Permaglas	-	250	18	21.6	-	> 5
	Conductores interiores 1-2	Alu-7075-T73	303	386	21	25.2	> 5	> 5
	Conductores interiores 3-4	CuBe	1258	1329	66.9	80.3	> 5	> 5
	Conectores	CuBe	1258	1329	89.9	107.9	> 5	> 5

	Soportes PTFE	PTFE	-	25	0.19	0.2	-	> 5
--	---------------	------	---	----	------	-----	---	-----

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- **Máxima tensión 3- σ Von Mises: 248.4 en la Cubierta en Random X**
- **Mínimo margen de seguridad: MSD=0.11 MSR=0.24 en la Cubierta en Random X**
- **Todas las tensiones son inferiores a los permisibles de todos los materiales y todos los márgenes positivos, por tanto cumple con los requerimientos especificados para Random**

En las figuras 5.6-4 a 5.6-12 se muestran las tensiones máximas en la Antena para los tres conjuntos de carga Random:

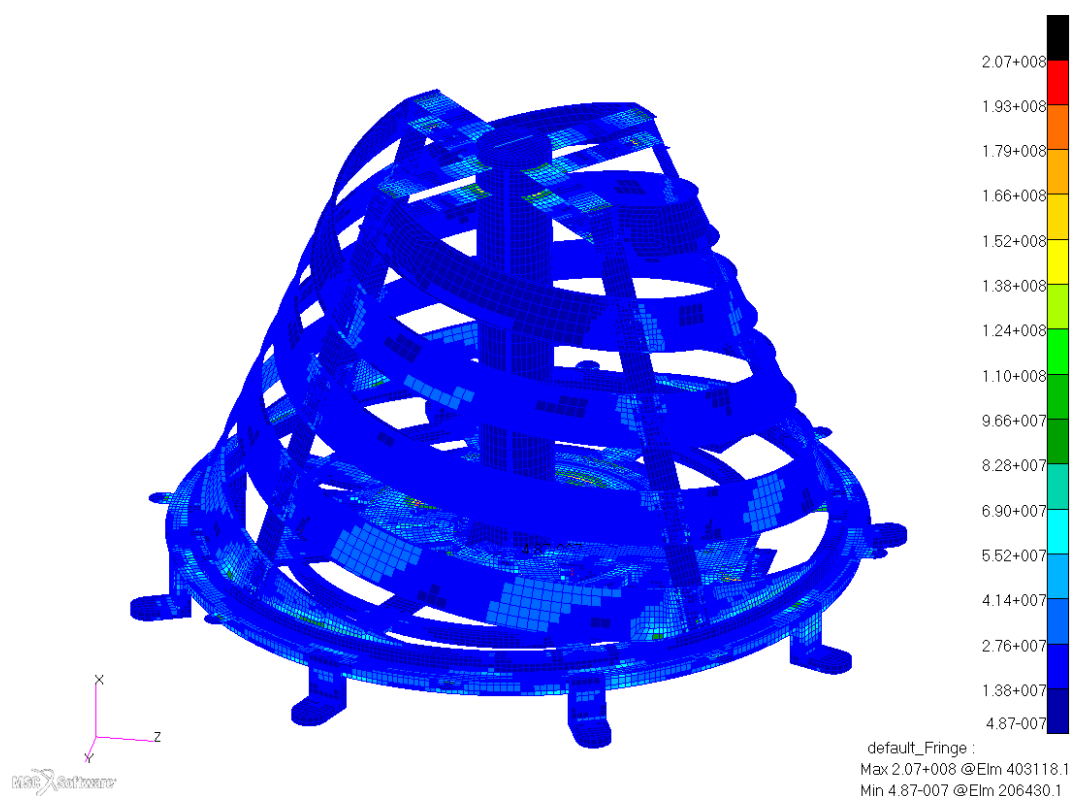


Figura 5.6-4.- Máxima tensión 3- σ Von Mises (Pa) en Random X (vista superior).

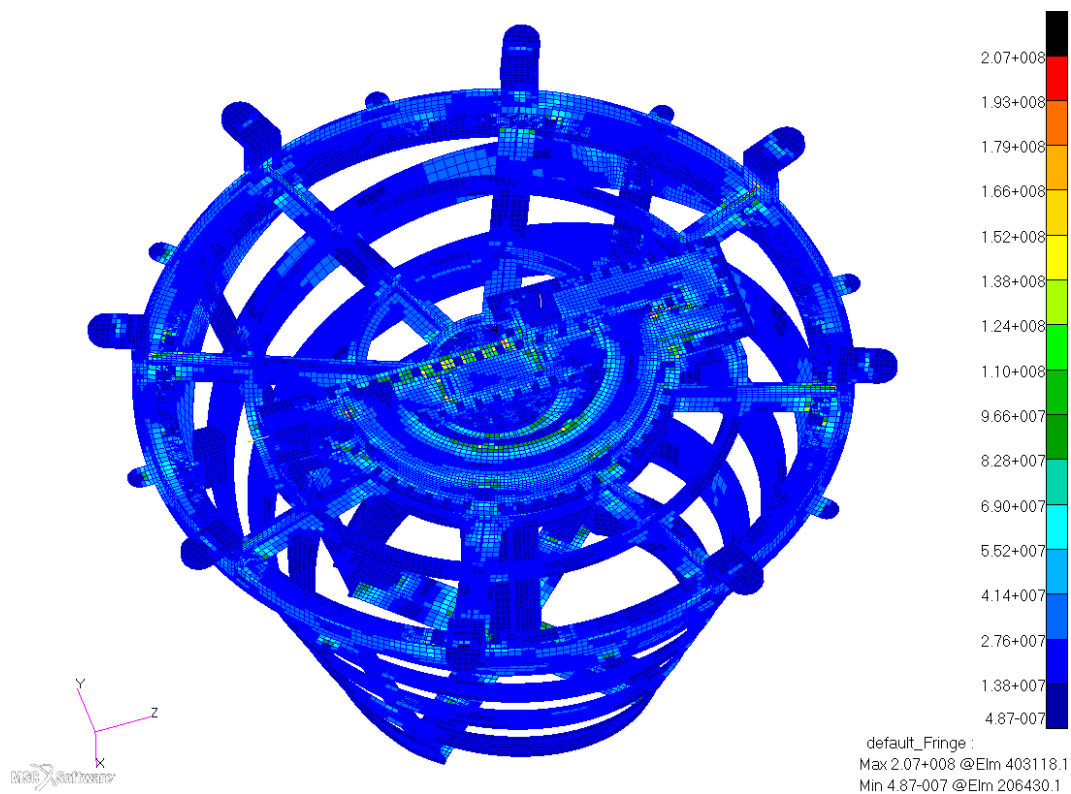


Figura 5.6-5.- Máxima tensión 3- σ Von Mises (Pa) en Random X (vista inferior).

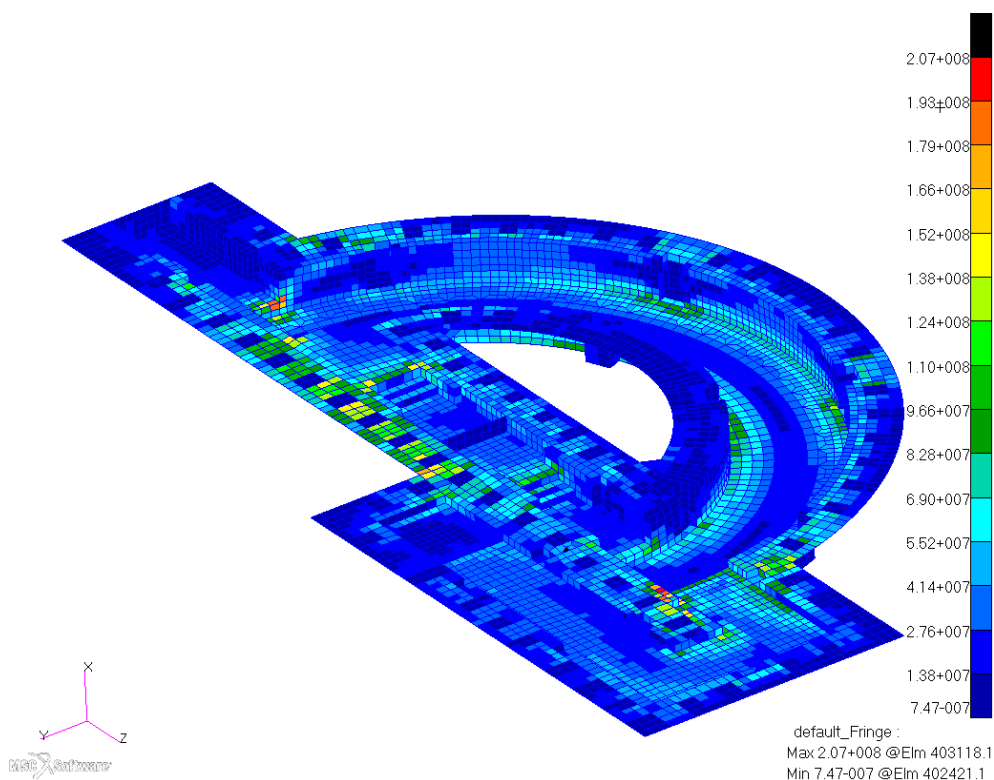


Figura 5.6-6.- Tensión 3- σ Von Mises (Pa) en la Cubierta en Random X.

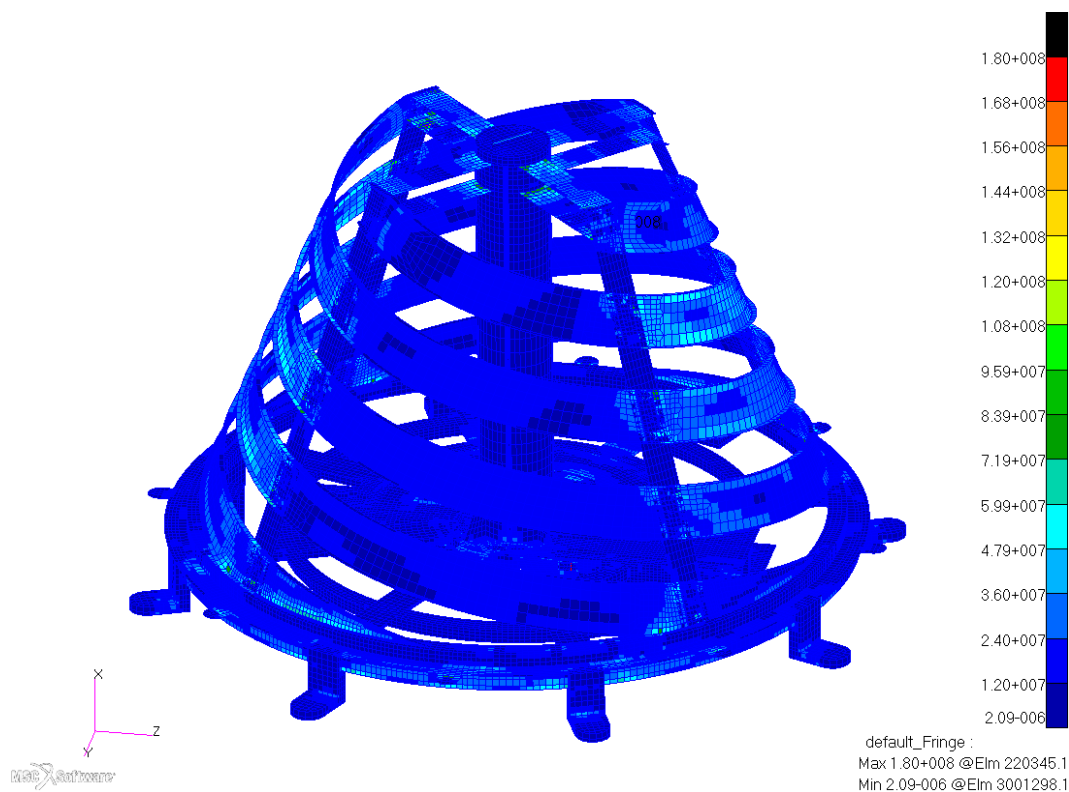


Figura 5.6-7.- Máxima tensión 3- σ Von Mises (Pa) en Random Y (vista superior).

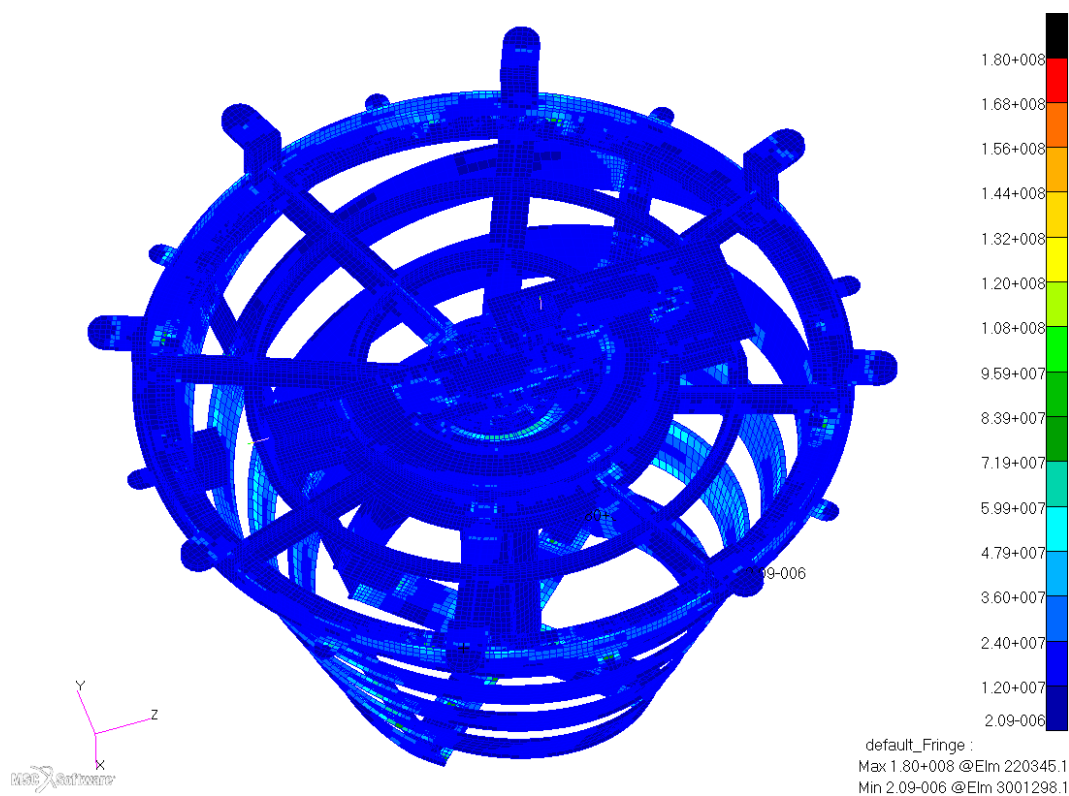


Figura 5.6-8.- Máxima tensión 3- σ Von Mises (Pa) en Random Y (vista inferior).

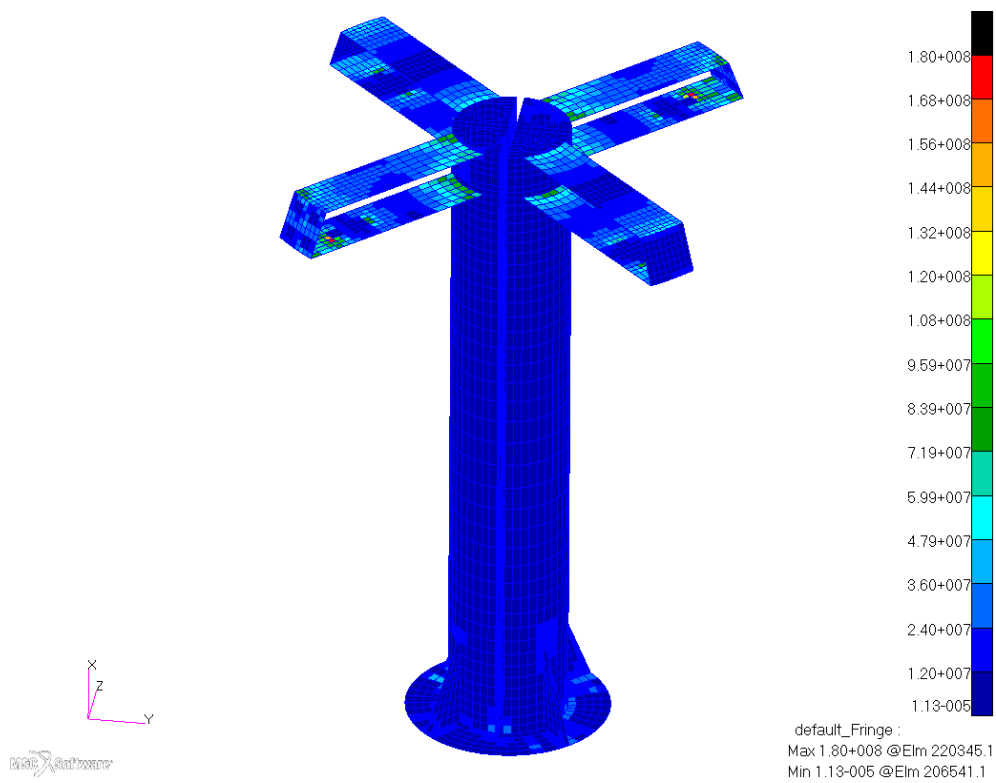


Figura 5.6-9.- Tensión 3- σ Von Mises (Pa) en Balun en Random Y.

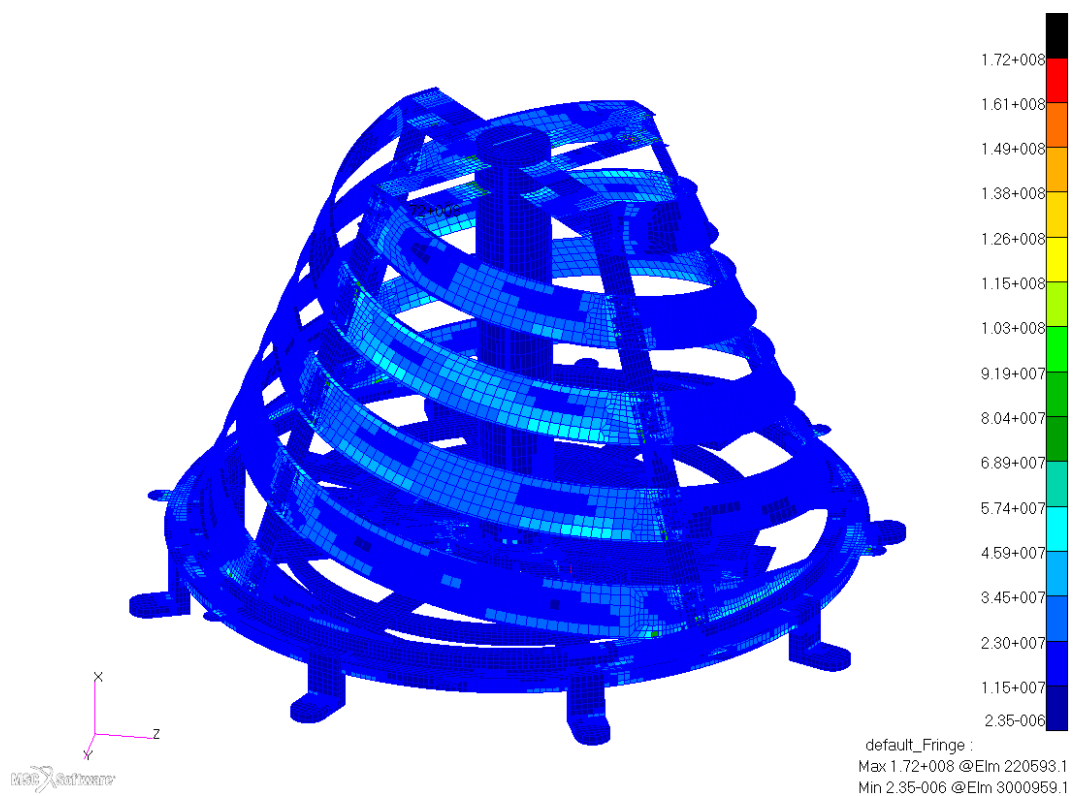


Figura 5.6-10.- Máxima tensión 3- σ Von Mises (Pa) en Random Z (vista superior).

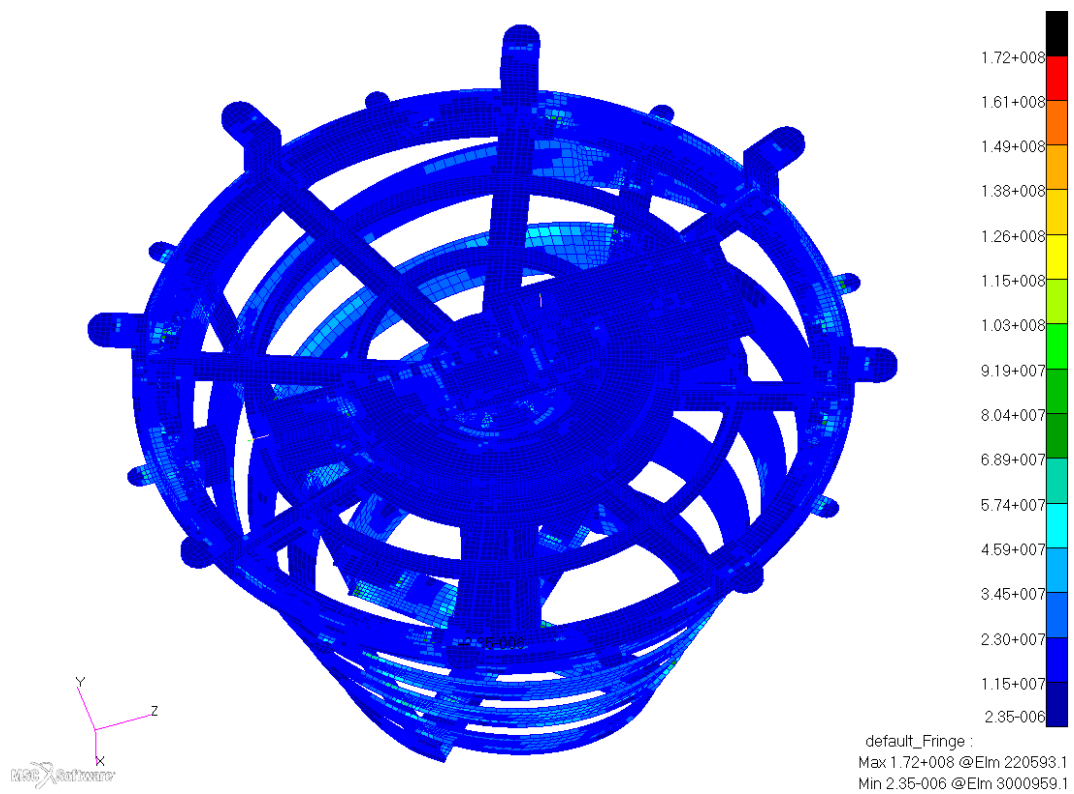


Figura 5.6-11.- Máxima tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Random Z (vista inferior).

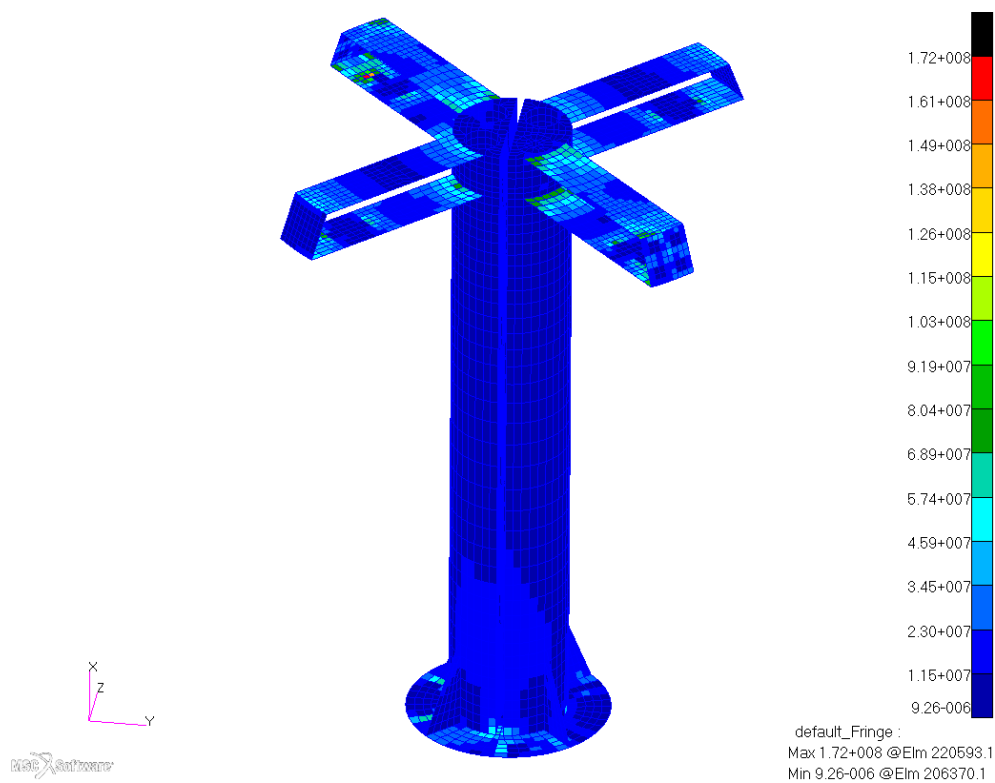


Figura 5.6-12.- Tensión $3\text{-}\sigma$ Von Mises (Pa) en Balum en Random Z.

5.6.3.2.- Reacciones máximas en la Interfaz

En la tabla 5.6-4 se presentan las reacciones máximas en cada punto de interfaz para los tres conjuntos de carga Random.

Tabla 5.6-4.- Máximas reacciones en los puntos de Interfaz

Punto de I/F	Dirección	Random X [N]	Random Y [N]	Random Z [N]
	Fx	341.01	76.44	159.40
	Fy	247.03	168.84	77.14
	Fz	498.45	86.50	162.32
	Fx	470.44	139.09	229.74
	Fy	312.12	166.17	120.76
	Fz	536.70	94.74	204.91
	Fx	202.01	153.98	53.40
	Fy	288.32	135.70	60.64
	Fz	115.35	45.24	126.64
	Fx	316.12	228.43	123.04
	Fy	354.11	196.57	71.80
	Fz	75.73	92.98	122.95
	Fx	386.45	90.63	166.96
	Fy	283.82	163.77	60.18
	Fz	621.56	106.90	166.63
	Fx	398.86	151.64	232.72
	Fy	246.07	156.64	99.82
	Fz	511.45	130.73	196.56
	Fx	218.42	162.36	68.62
	Fy	350.66	154.65	55.37
	Fz	95.00	53.95	131.91
	Fx	354.77	234.44	114.54
	Fy	375.15	203.28	78.61
	Fz	161.25	108.03	137.34

Las reacciones en todos los puntos de interfaz son menores que los valores requeridos de 600N para fuerza axial y 1500N para cortante. Por tanto se cumple con los requisitos especificados

A fin de aclarar donde se encuentran las fuerzas, que se presenta en la figura 5.6-13 el etiquetado de los taladros de interfaz.

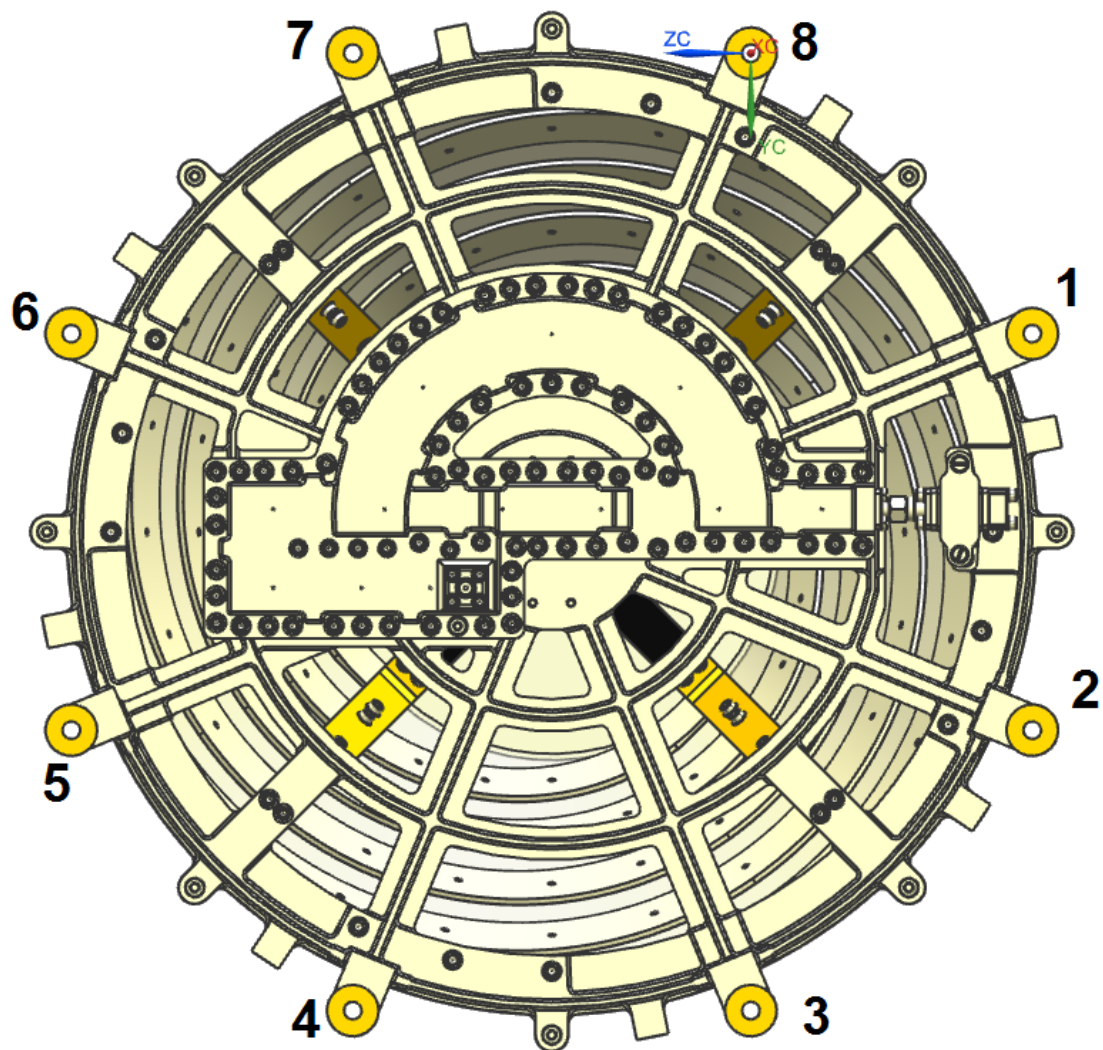


Figura 5.6-13.- Numeración de los nodos de interfaz.

5.6.4.-CHOQUE

5.6.4.1.-Tensiones máximas

La tabla 5.6-5 muestra las tensiones de Von Mises y los márgenes de seguridad obtenidos en los diferentes componentes de la antena para los 3 conjuntos de carga de choque:

Tabla 5.6-5.- Máximas Tensiones Von Mises para Choque

Conjunto de carga	Componente	Material	σ_Y [MPa]	σ_U [MPa]	σ_{VM} [MPa]	MSD	MSR
	Radomo	Fibra de vidrio	-	350	198	-	0.41
	Elemento radiante	Alu-7075-T73	303	386	227	0.21	0.36
	Balun	Alu-7075-T73	303	386	207	0.33	0.49
	Cuerpo principal	Alu-7075-T73	303	386	261	0.06	0.18
	Cubierta	Alu-7075-T73	303	386	203	0.36	0.52
	Soporte de la carga	Alu-7075-T73	303	386	121	1.28	1.55
	Correas	Permaglas	-	250	44.8	-	3.46
	Conductores interiores 1-2	Alu-7075-T73	303	386	163	0.69	0.89
	Conductores interiores 3-4	CuBe	1258	1329	313	2.65	2.40
	Conectores	CuBe	1258	1329	153	> 5	> 5
	Soportes PTFE	PTFE	-	25	0.93	-	> 5
	Radomo	Fibra de vidrio	-	62	22.0	-	1.25
	Radomo	Fibra de vidrio	-	350	177	-	0.58
	Elemento radiante	Alu-7075-T73	303	386	220	0.25	0.40
	Balun	Alu-7075-T73	303	386	253	0.09	0.22
	Cuerpo principal	Alu-7075-T73	303	386	264	0.04	0.17
	Cubierta	Alu-7075-T73	303	386	132	1.09	1.34
	Soporte de la carga	Alu-7075-T73	303	386	73.3	2.76	3.21
	Correas	Permaglas	-	250	52.2	-	2.83
	Conductores interiores 1-2	Alu-7075-T73	303	386	254	0.08	0.22
	Conductores interiores 3-4	CuBe	1258	1329	440	1.60	1.42
	Conectores	CuBe	1258	1329	129	> 5	> 5
	Soportes PTFE	PTFE	-	25	1	-	> 5
	Radomo	Fibra de vidrio	-	62	31.5	-	0.57
	Radomo	Fibra de vidrio	-	350	166	-	0.69
	Elemento radiante	Alu-7075-T73	303	386	201	0.37	0.54
	Balun	Alu-7075-T73	303	386	267	0.03	0.16



	Cuerpo principal	Alu-7075-T73	303	386	222	0.24	0.39
	Cubierta	Alu-7075-T73	303	386	182	0.51	0.70
	Soporte de la carga	Alu-7075-T73	303	386	207	0.33	0.49
	Correas	Permaglas	-	250	54.9	-	2.64
	Conductores interiores 1-2	Alu-7075-T73	303	386	168	0.64	0.84
	Conductores interiores 3-4	CuBe	1258	1329	297	2.85	2.58
	Conectores	CuBe	1258	1329	250	3.57	3.25
	Soportes PTFE	PTFE	-	25	0.7	-	> 5
	Radomo	Rexolita	-	62	28.1	-	0.77

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- **Máxima Tensión Von Mises: 440 MPa en Conductores interiores 3-4 en Choque Y**
- **Mínimo Margen de seguridad: MSD=0.03 MSR=0.16 en Balun en Choque Z**
- **Todas las tensiones son inferiores a los permisibles de todos los materiales y todos los márgenes positivos, por tanto cumple con los requerimientos especificados para choque**

En las figuras 5.6-14 a 5.6-25 se muestran las tensiones máximas en la Antena para los tres conjuntos de carga de choque:

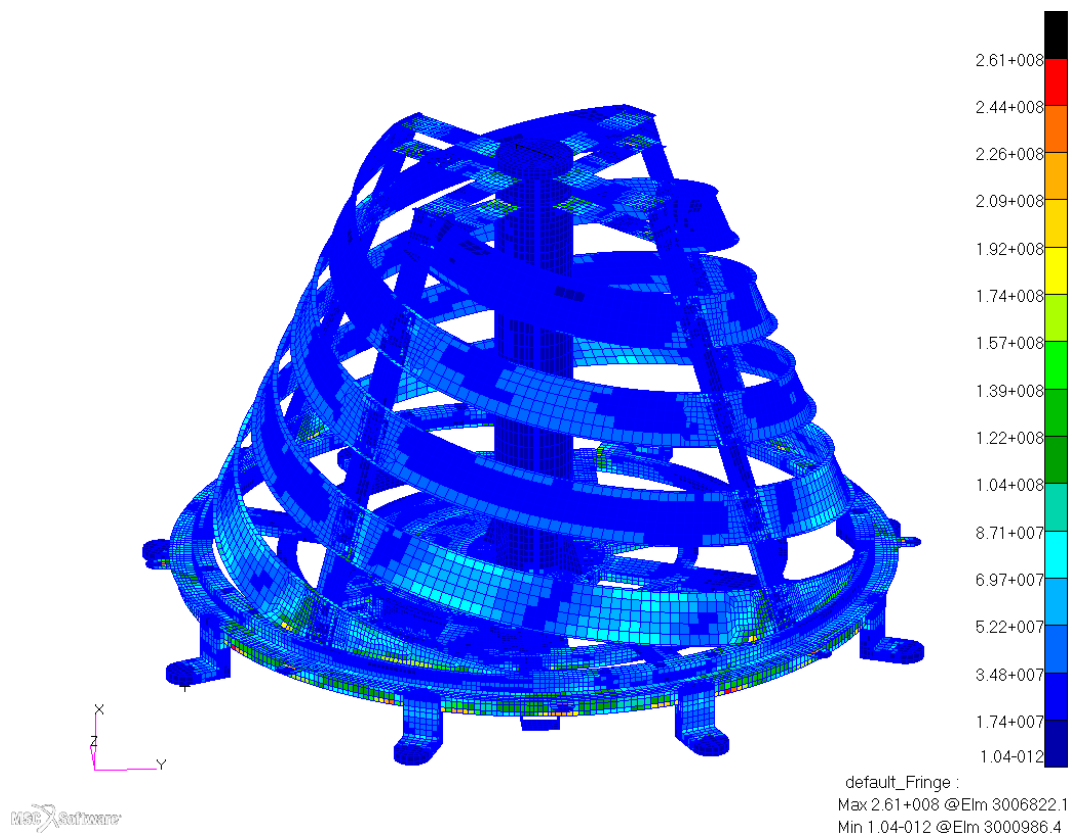


Figura 5.6-14.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque X (vista superior).

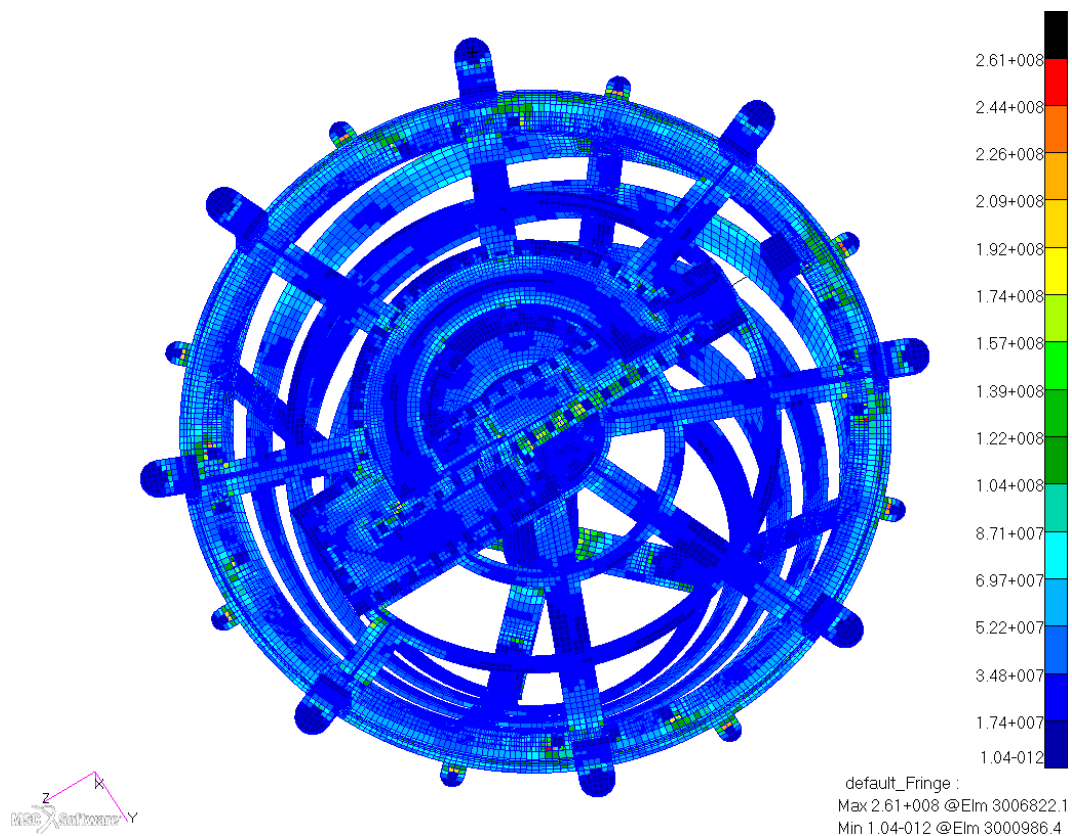


Figura 5.6-15.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque X (vista inferior).

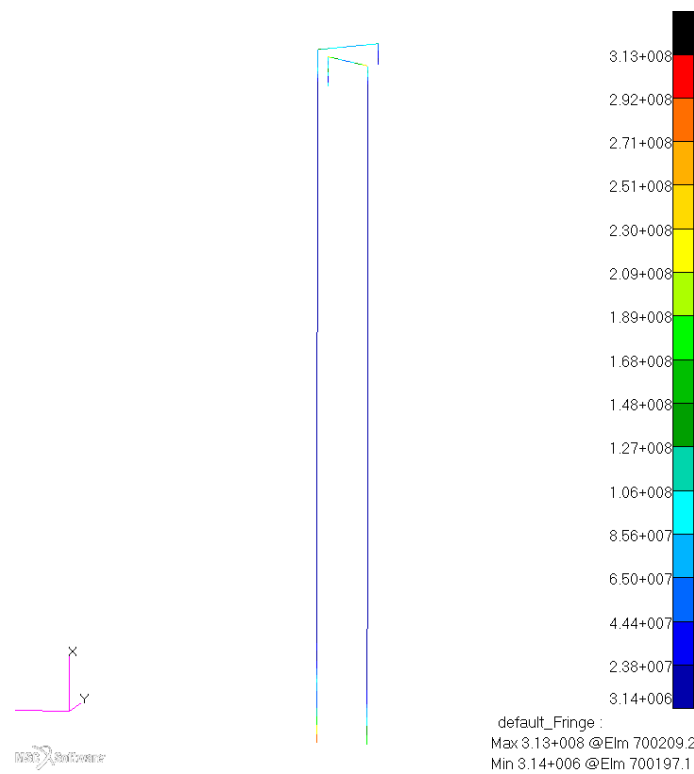


Figura 5.6-16.- Tensión Von Mises (Pa) en Conductores interiores 3-4 en Choque X.

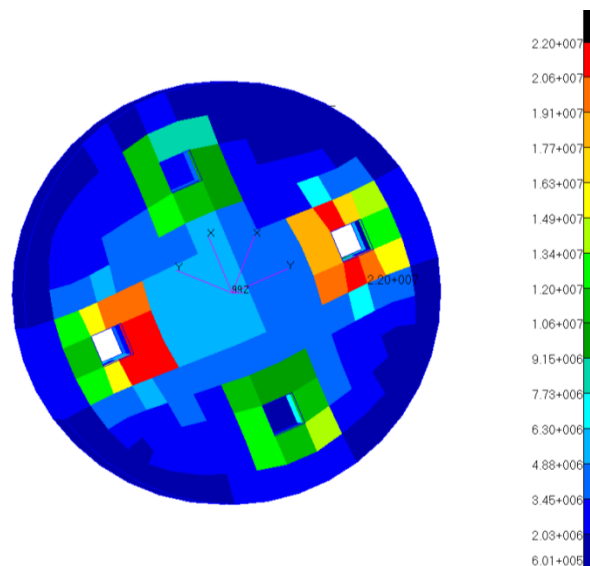


Figura 5.6-17.- Tensión Von Mises (Pa) en pieza de Rexolita en Choque X.

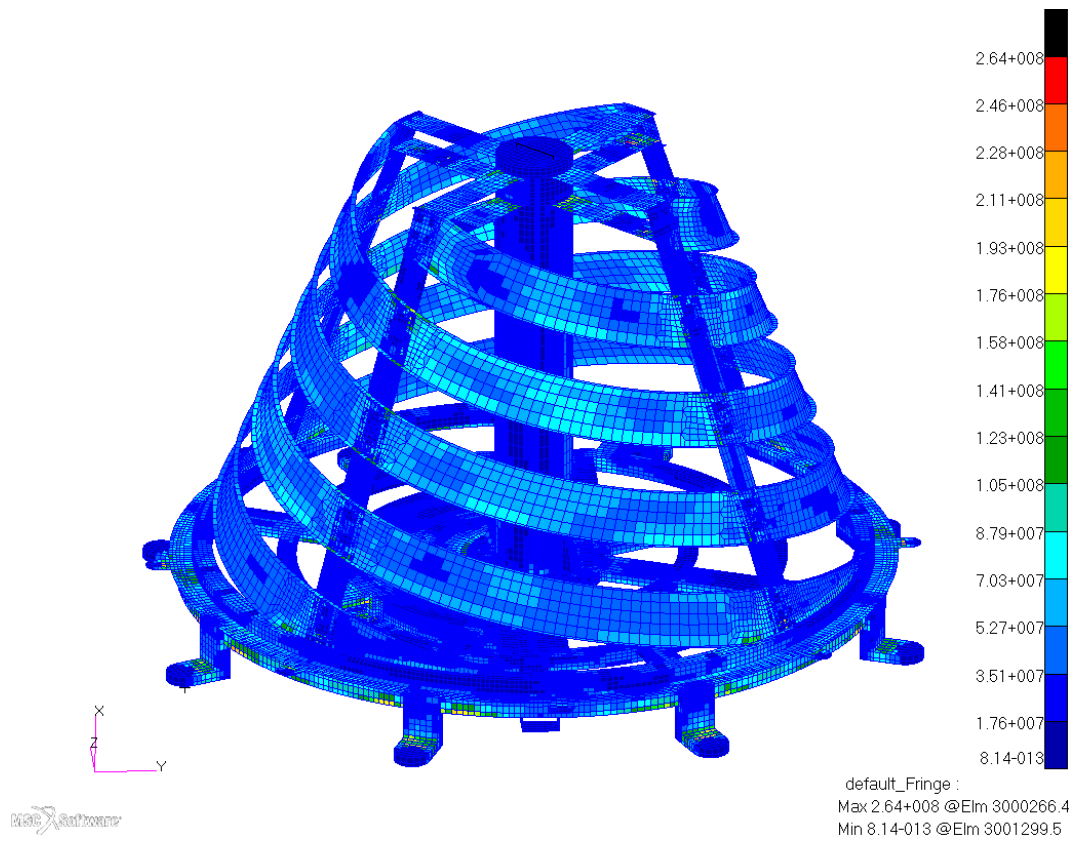


Figura 5.6-18.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque Y (vista superior).

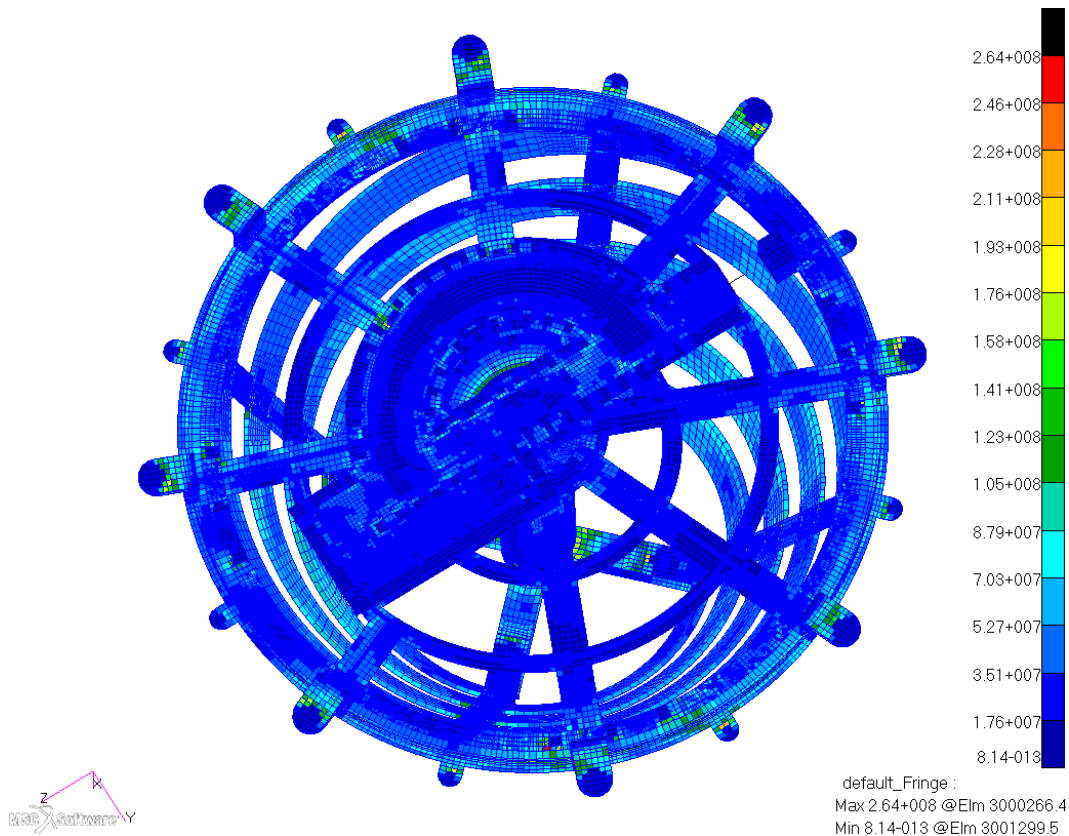


Figura 5.6-19.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque Y (vista inferior).

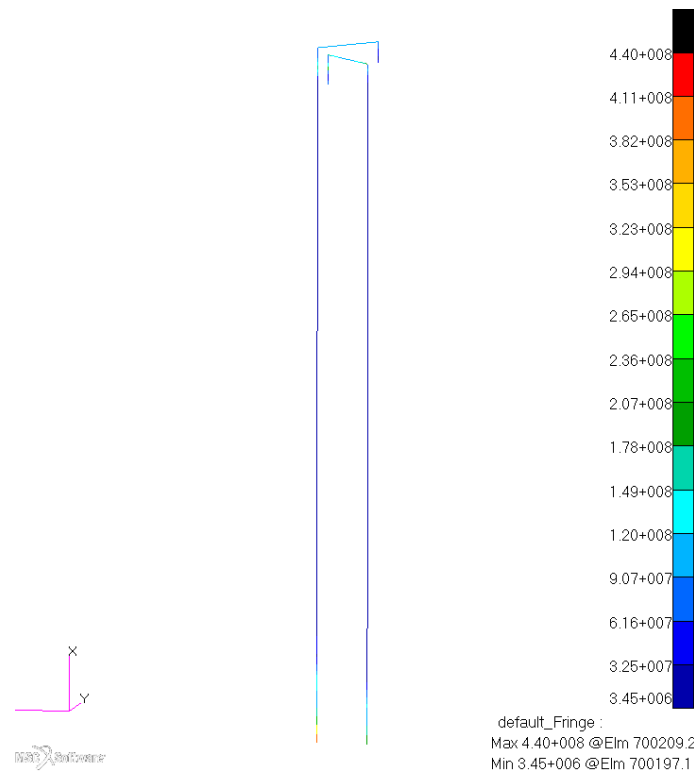


Figura 5.6-20.- Tensiones Von Mises (Pa) en Conductores Interiores 3-4 en Choque Y.

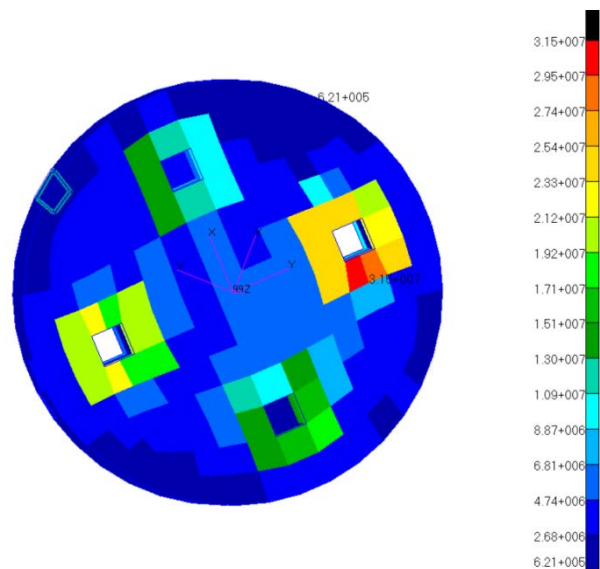


Figura 5.6-21.- Tensiones Von Mises (Pa) en Piezas de Rexolita en Choque Y.

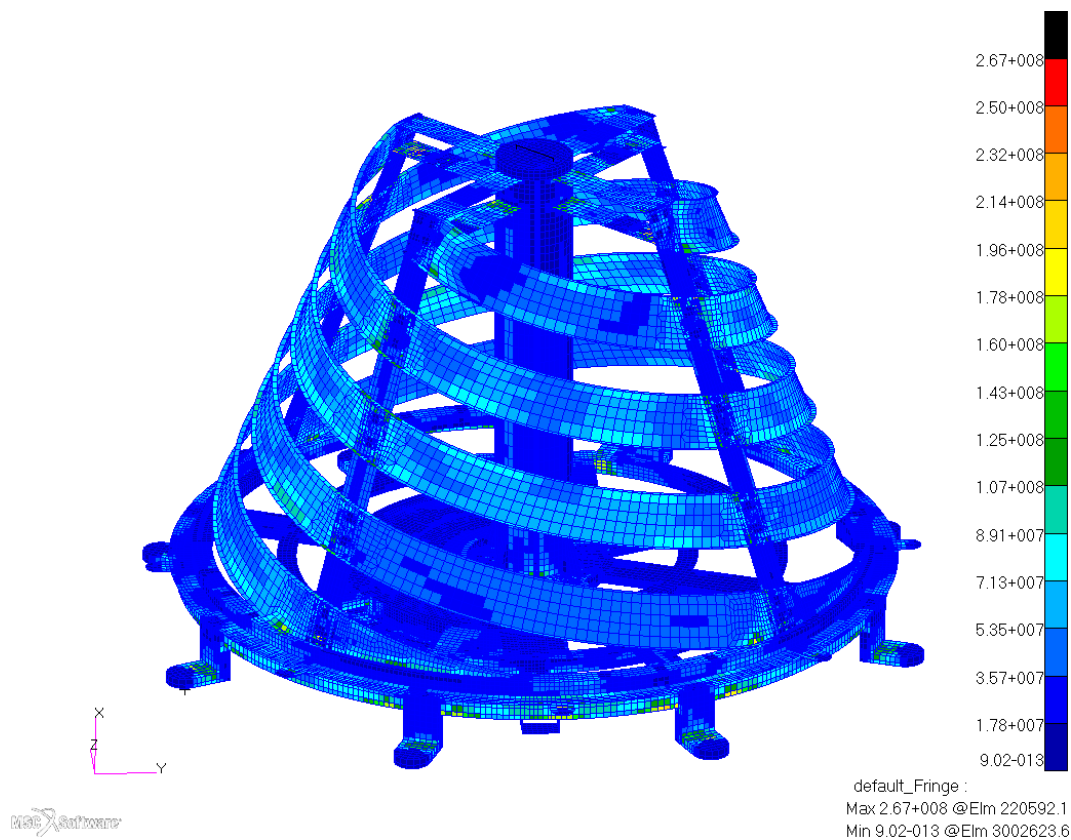


Figura 5.6-22.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque Z (vista superior).

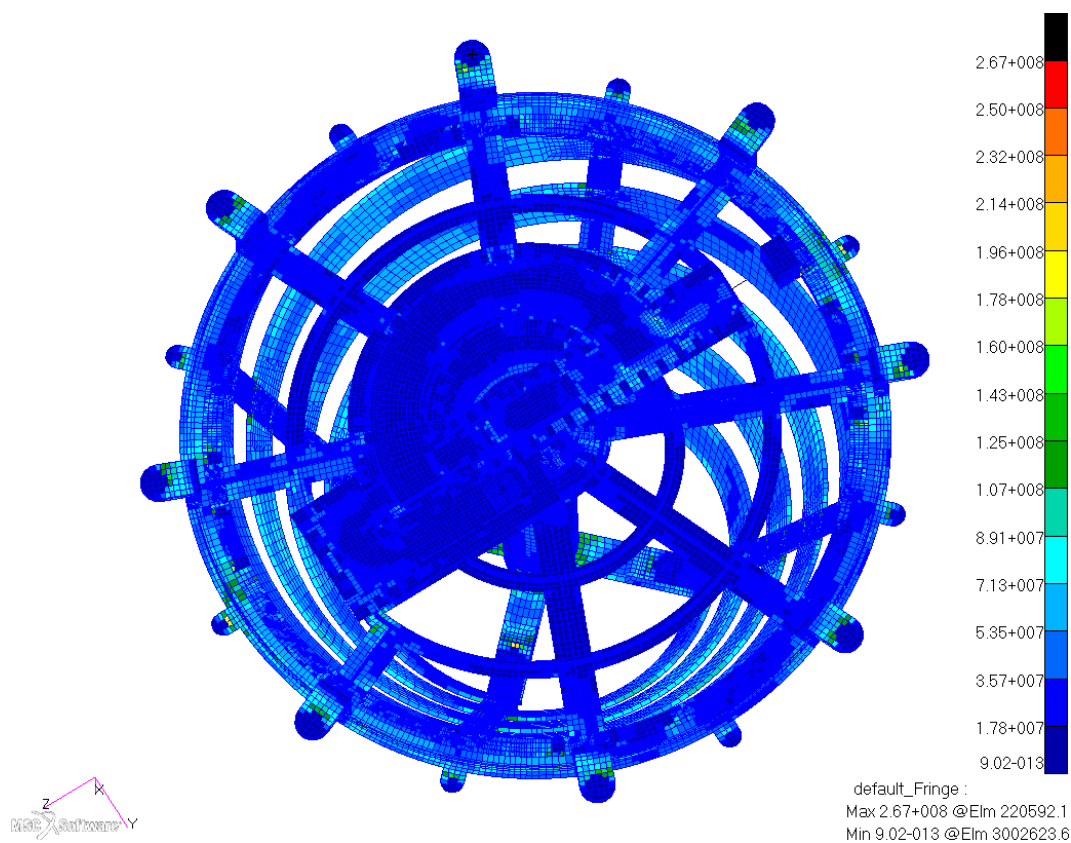


Figura 5.6-23.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Choque Z (vista inferior).

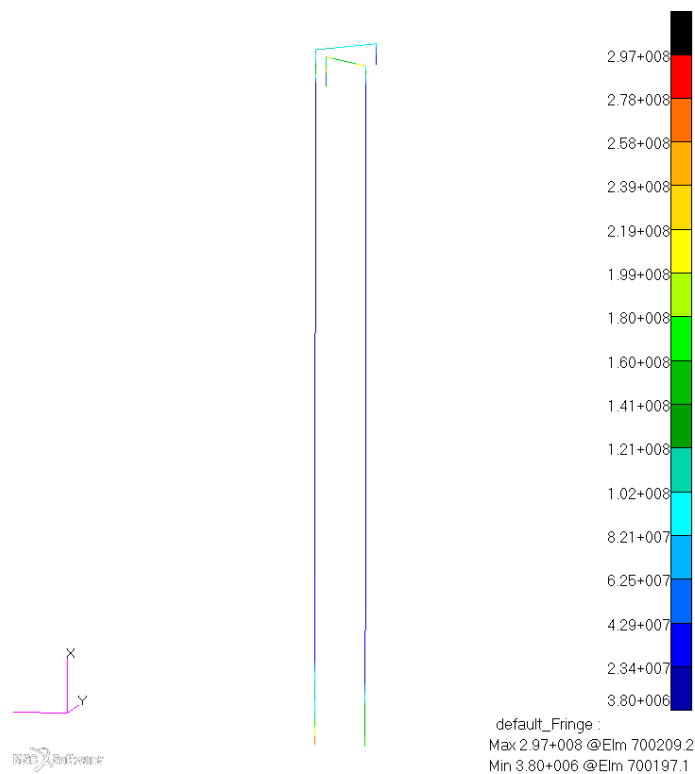


Figura 5.6-24.- Tensión Von Mises (Pa) en Conductores Interiores 3-4 en Choque Z.

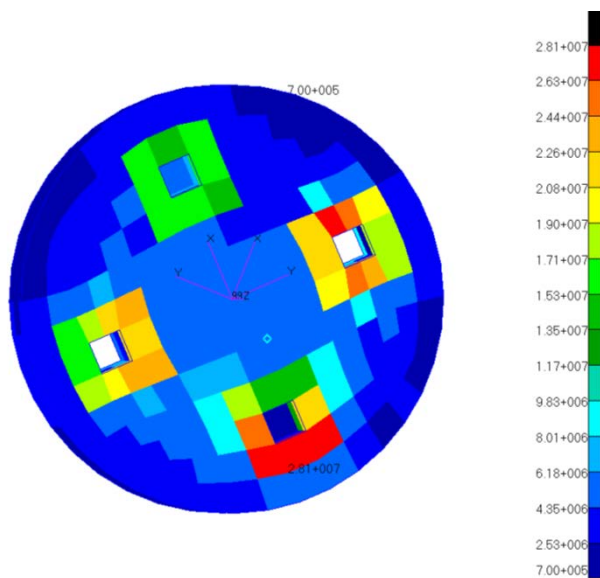


Figura 5.6-25.- Tensiones Von Mises (Pa) en Piezas de Rexolita en Choque Z.



5.6.5.-ANALISIS DE TORNILLOS

Se han calculado las fuerzas máximas para todos los casos de carga analizados (Random y Choque) para los tornillos internos de la antena, así como para los tornillos de interfaz. Sólo se presentan los peores casos.

Las siguientes tablas resumen los datos para todos los tornillos, así como los márgenes de seguridad obtenidos para los modos de fallo perno (deslizamiento, separación, deformación y rotura).

Para el modo de deslizamiento:

- Fuerza de trabajo en el plano: El promedio de la fuerza de corte resultante que actúa sobre todos los tornillos de la unión
- Fuerza de trabajo fuera del plano: El promedio de la fuerza axial resultante que actúa sobre todos los tornillos de la unión

Para los modos de fallo separación, deformación y rotura:

- Fuerza de trabajo fuera del plano: la fuerza axial máxima de todas las fuerzas axiales que actúan sobre cada tornillo.

5.6.5.1.-Tornillos internos

En las tablas 5.6-6 a 5.6-8 se presentan los resultados para todos los modos de fallo de los tornillos internos del equipo. Sólo se presenta el peor caso para cada tamaño de tornillo:

Tabla 5.6-6.- Márgenes de seguridad para tornillos internos de M2.5 para los modos de fallo.

UNION TORNILLOS INTERNOS M2.5			
Datos del tornillo			Márgenes de seguridad para los modos de fallo de tornillos
Material	Acero Inox		
Módulo de Young	210000	[N/mm ²]	
Métrica	2.5	[mm]	
Paso del tornillo	0.45	[mm]	
Coeficiente de fricción del tornillo	0.20		
Diámetro de la sección[mm]	2.08	[mm]	
Área de la sección [mm ²]	3.39	[mm ²]	
Tensión límite a deformación	450.0	[MPa]	
Tensión límite a rotura	700.0	[MPa]	
Factor de dispersión (precarga)	1.4		
Mínima precarga del tornillo	664	[N]	
Precarga nominal del tornillo	796	[N]	
Máxima precarga del tornillo	929	[N]	
Par de torsión	0.3	[Nm]	
Par de apriete	0.5	[Nm]	
Datos de la unión			
Altura brida 1	2.0	[mm]	
Módulo de Young	71700	[N/mm ²]	
Altura brida 2	2.5	[mm]	
Módulo de Young	71700	[N/mm ²]	
Rigidez del conjunto	2.1E+08	[N/m]	
Rigidez del tornillo	1.6E+08	[N/m]	
Coef de carga externa de la unión	0.57		
Coef de carga externa del tornillo	0.43		
Coeficiente de fricción de la unión	0.2		
			Margen de seguridad para Deslizamiento
			Fuerza en el plano perpendicular 3.0 [N]
			Fuerza en el plano paralelo 5.4 [N]
			Factor de seguridad para deslizamiento 1.10
			Margen de seguridad para deslizamiento > 5
			Margen de seguridad para Separación
			Fuerza en el plano perpendicular 50.7 [N]
			Factor de seguridad para separación 1.10
			Margen de seguridad para separación > 5
			Margen de seguridad para Deformación
			Factor de seguridad para deformación 1.10
			Fuerza en el plano perpendicular 50.7 [N]
			Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS) 409.8 [MPa]
			Factor de seguridad para deformación 0.10
			Margen de seguridad para Rotura
			Factor de seguridad para rotura 1.25
			Fuerza en el plano perpendicular 50.7 [N]
			Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS) 410.5 [MPa]
			Factor de seguridad para rotura 0.71

Tabla 5.6-7.- Márgenes de seguridad para tornillos internos de M3 para los modos de fallo.

UNION TORNILLOS INTERNOS M3			
Datos del tornillo			
Material	Acero Inox		
Módulo de Young	210000	[N/mm ²]	
Métrica	3.0	[mm]	
Paso del tornillo	0.50	[mm]	
Coeficiente de fricción del tornillo	0.20		
Diámetro de la sección[mm]	2.53	[mm]	
Área de la sección [mm ²]	5.03	[mm ²]	
Tensión limite a deformación	450.0	[MPa]	
Tensión limite a rotura	700.0	[MPa]	
Factor de dispersión (precarga)	1.4		
Mínima precarga del tornillo	997	[N]	
Precarga nominal del tornillo	1196	[N]	
Máxima precarga del tornillo	1396	[N]	
Par de torsión	0.5	[Nm]	
Par de apriete	0.9	[Nm]	
Márgenes de seguridad para los modos de fallo de tornillos			
Margen de seguridad para Deslizamiento			
Fuerza en el plano perpendicular	228.4	[N]	
Fuerza en el plano paralelo	99.5	[N]	
Factor de seguridad para deslizamiento	1.10		
Margen de seguridad para deslizamiento	0.61		
Margen de seguridad para Separación			
Fuerza en el plano perpendicular	228.4	[N]	
Factor de seguridad para separación	1.10		
Margen de seguridad para separación	> 5		
Margen de seguridad para Deformación			
Factor de seguridad para deformación	1.10		
Fuerza en el plano perpendicular	228.4	[N]	
Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS)	423.8	[MPa]	
Factor de seguridad para deformación	0.06		
Margen de seguridad para Rotura			
Factor de seguridad para rotura	1.25		
Fuerza en el plano perpendicular	228.4	[N]	
Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS)	426.4	[MPa]	
Factor de seguridad para rotura	0.64		
Datos de la unión			
Altura brida 1	3.0	[mm]	
Módulo de Young	71700	[N/mm ²]	
Altura brida 2	3.0	[mm]	
Módulo de Young	20000	[N/mm ²]	
Rigidez del conjunto	1.5E+08	[N/m]	
Rigidez del tornillo	1.8E+08	[N/m]	
Coef de carga externa de la unión	0.46		
Coef de carga externa del tornillo	0.54		
Coeficiente de fricción de la unión	0.2		

Tabla 5.6-8.- Márgenes de seguridad para tornillos internos de M4 para los modos de fallo.

UNION TORNILLOS INTERNOS M4			
Datos del tornillo			Márgenes de seguridad para los modos de fallo de tornillos
Material	Acero Inox		
Módulo de Young	210000	[N/mm ²]	
Métrica	4.0	[mm]	
Paso del tornillo	0.70	[mm]	
Coeficiente de fricción del tornillo	0.20		
Diámetro de la sección[mm]	3.34	[mm]	
Área de la sección [mm ²]	8.78	[mm ²]	
Tensión límite a deformación	600.0	[MPa]	
Tensión límite a rotura	800.0	[MPa]	
Factor de dispersión (precarga)	1.4		
Mínima precarga del tornillo	2301	[N]	
Precarga nominal del tornillo	2762	[N]	
Máxima precarga del tornillo	3222	[N]	
Par de torsión	1.7	[Nm]	
Par de apriete	2.8	[Nm]	
Datos de la unión			
Altura brida 1	3.0	[mm]	
Módulo de Young	71700	[N/mm ²]	
Altura brida 2	5.0	[mm]	
Módulo de Young	71700	[N/mm ²]	
Rigidez del conjunto	3.2E+08	[N/m]	
Rigidez del tornillo	2.3E+08	[N/m]	
Coef de carga externa de la unión	0.58		
Coef de carga externa del tornillo	0.42		
Coeficiente de fricción de la unión	0.2		
			Margen de seguridad para Deslizamiento
Fuerza en el plano perpendicular		6.0	[N]
Fuerza en el plano paralelo		41.3	[N]
Factor de seguridad para deslizamiento		1.10	
Margen de seguridad para deslizamiento		> 5	
			Margen de seguridad para Separación
Fuerza en el plano perpendicular		474.0	[N]
Factor de seguridad para separación		1.10	
Margen de seguridad para separación		> 5	
			Margen de seguridad para Deformación
Factor de seguridad para deformación		1.10	
Fuerza en el plano perpendicular		474.0	[N]
Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS)		557.3	[MPa]
Factor de seguridad para deformación		0.08	
			Margen de seguridad para Rotura
Factor de seguridad para rotura		1.25	
Fuerza en el plano perpendicular		474.0	[N]
Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS)		559.6	[MPa]
Factor de seguridad para rotura		0.43	

Todos los márgenes de seguridad para los modos de fallo de los tornillos son positivos, por lo que cumplen con el criterio especificado.

5.6.5.2.-Tornillos de interfaz

Los 8 tornillos de interfaz deben ser de M5 para garantizar el margen de seguridad positivo en todos los modos de fallo. En la tabla 5.6-9 se presentan los resultados para todos los modos de fallos de los tornillos de interfaz del equipo

Tabla 5.6-9.- Márgenes de seguridad para tornillos de interfaz de M5 para los modos de fallo.

UNION TORNILLOS DE INTERFAZ M5			
Datos del tornillo			Márgenes de seguridad para los modos de fallo de tornillos
Material	Titanio		
Métrica	5.0	[mm]	
Paso del tornillo	0.8	[mm]	
Coeficiente de fricción del tornillo	0.08		
Diámetro de la sección[mm]	4.25	[mm]	
Área de la sección [mm ²]	14.18	[mm ²]	
Tensión limite a deformación	1040.0	[MPa]	
Tensión limite a rotura	1100.0	[MPa]	
Factor de dispersión (precarga)	1.4		
Mínima precarga del tornillo	4930.0	[N]	
Precarga nominal del tornillo	7584.0	[N]	
Máxima precarga del tornillo	10238.0	[N]	
Par de torsión	3.4	[Nm]	
Nominal Par de apriete	4.5	[Nm]	
Datos de la unión			
Coef de carga externa de la unión	1.00	(*)	
Coef de carga externa del tornillo	0.50	(*)	
Coeficiente de fricción de la unión	0.2		
			Margen de seguridad para Deslizamiento
			Fuerza en el plano perpendicular 470.4 [N]
			Fuerza en el plano paralelo 393.6 [N]
			Factor de seguridad para deslizamiento 1.10
			Margen de seguridad para deslizamiento 1.04
			Margen de seguridad para Separación
			Fuerza en el plano perpendicular 470.4 [N]
			Factor de seguridad para separación 1.10
			Margen de seguridad para separación > 5
			Margen de seguridad para Deformación
			Factor de seguridad para deformación 1.10
			Fuerza en el plano perpendicular 470.4 [N]
			Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS) 838.2 [MPa]
			Factor de seguridad para deformación 0.24
			Margen de seguridad para Rotura
			Factor de seguridad para rotura 1.25
			Fuerza en el plano perpendicular 470.4 [N]
			Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS) 840.4 [MPa]
			Factor de seguridad para rotura 0.31

(*) Análisis del peor caso

Todos los márgenes de seguridad para los modos de fallo de los tornillos son positivos, por lo que cumplen con el criterio especificado.

5.6.6.-ANÁLISIS DE VENTILACIÓN

12 orificios de ventilación se han realizado sobre la cara inferior de la red de alimentación (en la Cubierta) con el fin de evacuar el volumen de aire dentro de la antena durante la fase de lanzamiento.

La cavidad interna del radomo tiene suficiente ventilación a través de los orificios de la placa base del Cuerpo Principal, por lo tanto no necesita agujeros de ventilación extras

A continuación se describe cómo varía la presión en un volumen para un flujo de aire:

$$\frac{d \ln P_i}{dt} = -\frac{C_D A}{V} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{R}{m} T} \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad \text{Eq. [1]}$$

Si el flujo se comprime entonces eq. [1] se convierte en:

$$\frac{d \ln P_i}{dt} = -\frac{C_D A}{V} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\left(\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}\right)} \sqrt{\gamma \frac{R}{m} T} \quad \text{Eq. [2]}$$

Donde:

A	Área de los agujeros de ventilación	6.03	[mm ²]
n	Número de agujeros	12	
D	Diámetro de los agujeros	0.8	[mm]
V	Volumen cerrado de aire	0.11	[litros]
A/V	Área ventilación/volumen aire	548.3	[mm ² /litro]

$$A = n \frac{\pi D^2}{4}$$

γ	Coeficiente aire	1.4	
R	Cte universal	8.314	[J/mol/K]
T	Temp aire a P atmosférica	273.2	[K]
Patm	Presión atmosférica	(*)	[Pa]
m	masa molecular del aire	28.96	[g/mol]
CD	Coeficiente de descarga		

Integrando las ecuaciones [1] y [2] para este perfil de presión externa, obtenemos que la diferencia de presión entre las partes internas y externas del equipo es de 0 Pa, es decir, no hay variación de la presión, y obviamente cumple con el requisito de 6900Pa/s

Por lo tanto la despresurización adecuada durante la fase de lanzamiento está garantizada con los 12 orificios de ventilación previstos como muestra la tabla 5.6-10

Tabla 5.6-10.- Diferencia de presión entre el interior del equipo y el ambiente

Análisis de ventilación		
Datos de ventilación:		
Diámetro de los agujeros	0.8	[mm]
Número de agujeros	12	
Área de ventilación (A)	6.03	[mm ²]
Volumen de aire (V)	0.11	[litros]
Coef de ventilación (A/V)	548.35	[m ² /m ³ ·10 ⁻⁴]
Datos de lanzamiento:		
Max. variación de presión	6900.00	[Pa/s]
Tiempo de cada paso	0.010	[s]
Resultados:		
Max. Diferencia de Presión (ΔP)	0	[Pa]

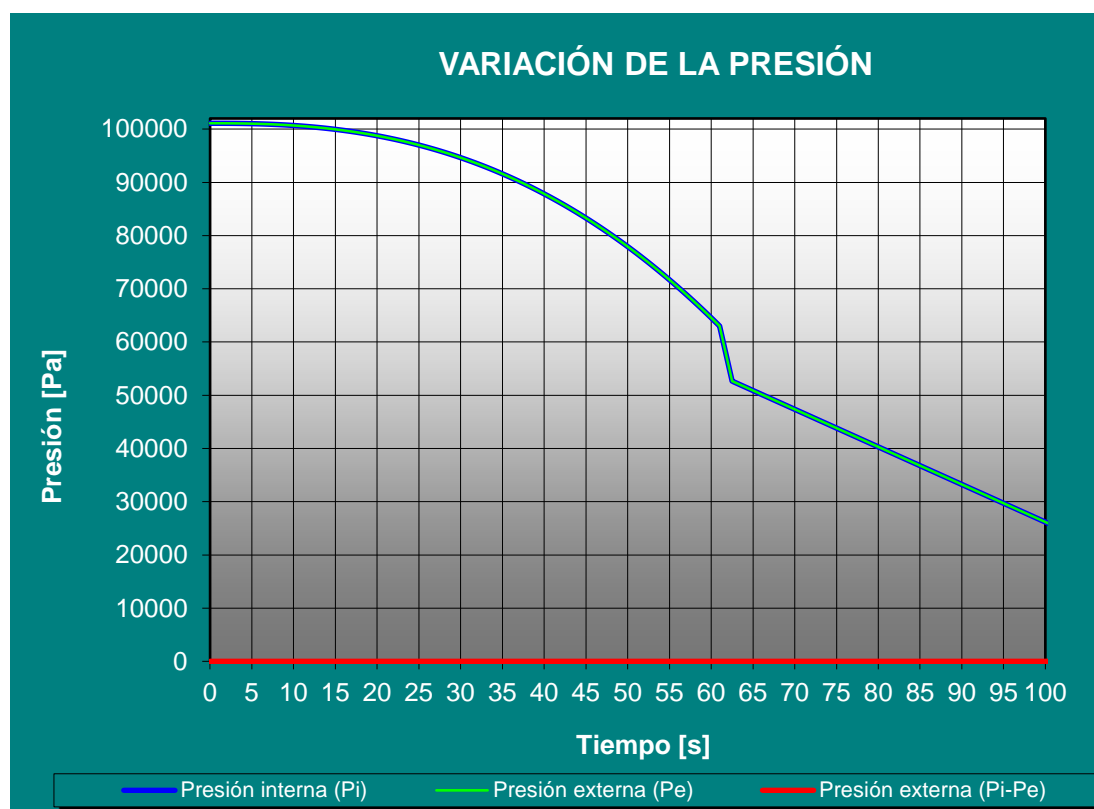


Figura 5.6-26.-Variación de la presión-tiempo

5.6.7.-ANALISIS CUASIESTATICO

5.6.7.1.-Máximas Tensiones

La tabla 5.6-11 muestra las Tensiones de Von Mises y los márgenes de seguridad obtenidos en los diferentes componentes de la Antena UHF para los tres conjuntos de cargas cuasi-estáticas:

Tabla 5.6-11.- Máximas Tensiones Von Mises para Cuasi-estático

Conjunto de carga	Componente	Material	σ_Y [MPa]	σ_U [MPa]	σ_{VM} [MPa]	MSD	MSR
	Radomo	Fibra de vidrio	-	350	5.19	-	>5
	Elemento radiante	Alu-7075-T73	303	386	8.66	>5	>5
	Balun	Alu-7075-T73	303	386	9.41	>5	>5
	Cuerpo principal	Alu-7075-T73	303	386	14.8	>5	>5
	Cubierta	Alu-7075-T73	303	386	11.6	>5	>5
	Soporte de la carga	Alu-7075-T73	303	386	2.26	>5	>5
	Correas	Permaglas	-	250	1.56	-	>5
	Conductores interiores 1-2	Alu-7075-T73	303	386	5.28	>5	>5
	Conductores interiores 3-4	CuBe	1258	1329	10.7	>5	>5
	Conectores	CuBe	1258	1329	3.12	>5	>5
	Soportes PTFE	PTFE	-	25	0.05	-	>5
	Radomo	Fibra de vidrio	-	350	4.99	-	>5
	Elemento radiante	Alu-7075-T73	303	386	8.53	>5	>5
	Balun	Alu-7075-T73	303	386	13.5	>5	>5
	Cuerpo principal	Alu-7075-T73	303	386	9.37	>5	>5
	Cubierta	Alu-7075-T73	303	386	8.34	>5	>5
	Soporte de la carga	Alu-7075-T73	303	386	1.05	>5	>5
	Correas	Permaglas	-	250	2.31	-	>5
	Conductores interiores 1-2	Alu-7075-T73	303	386	2.33	>5	>5
	Conductores interiores 3-4	CuBe	1258	1329	5.91	>5	>5
	Conectores	CuBe	1258	1329	5.63	>5	>5
	Soportes PTFE	PTFE	-	25	0.04	-	>5
	Radomo	Fibra de vidrio	-	350	4.86	-	>5
	Elemento radiante	Alu-7075-T73	303	386	7.91	>5	>5
	Balun	Alu-7075-T73	303	386	12.4	>5	>5
	Cuerpo principal	Alu-7075-T73	303	386	11.3	>5	>5
	Cubierta	Alu-7075-T73	303	386	4.26	>5	>5
	Soporte de la carga	Alu-7075-T73	303	386	4.74	>5	>5
	Correas	Permaglas	-	250	2.18	-	>5
	Conductores interiores 1-2	Alu-7075-T73	303	386	1.88	>5	>5
	Conductores interiores 3-4	CuBe	1258	1329	8.94	>5	>5
	Conectores	CuBe	1258	1329	2.63	>5	>5
	Soportes PTFE	PTFE	-	25	0.02	-	>5

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- **Máxima tensión Von Mises: 14.8 MPa en Cuerpo Principal en cuasi-estático X.**
- **Mínimo Margen de seguridad: MSD>5 y MSR>5 en Cuerpo Principal en cuasi-estático X.**
- **Todas las tensiones son inferiores a los permisibles de todos los materiales y todos los márgenes positivos, por tanto cumple con los requerimientos especificados para cargas cuasi-estáticas**

En las figuras 5.6-27 y 5.6-28 se muestran las tensiones máximas en la Antena para los conjuntos de carga cuasi-estática:

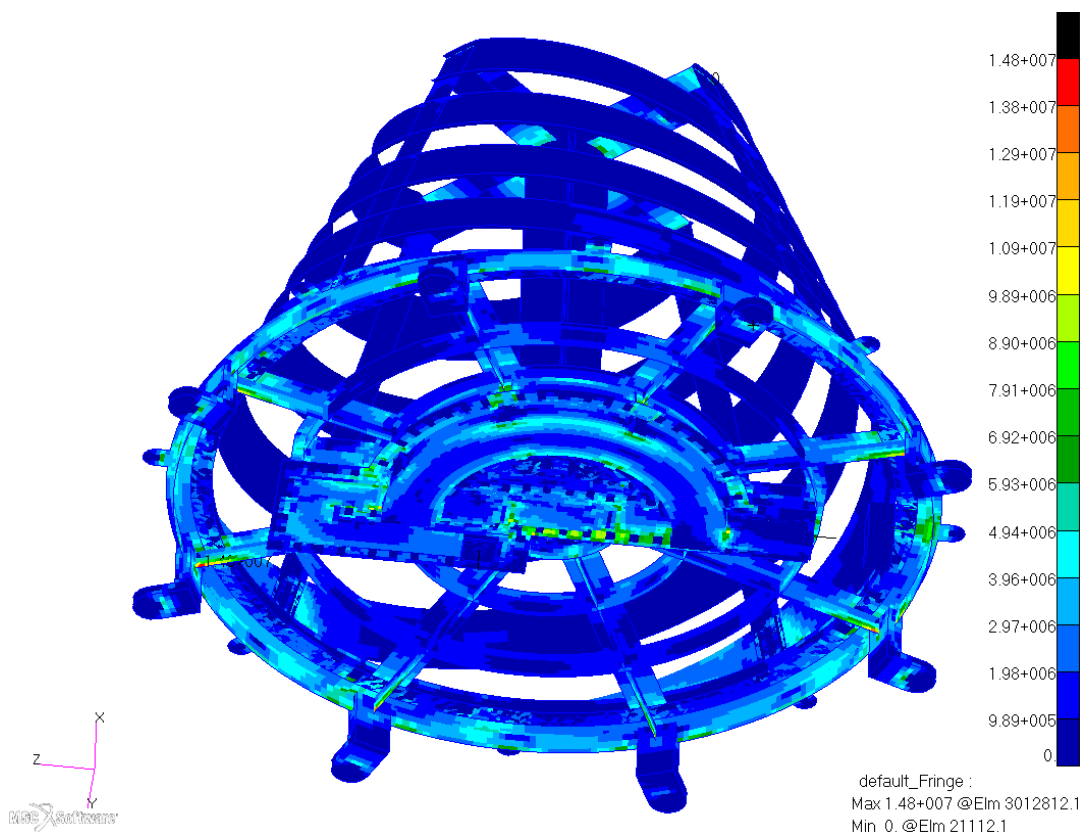
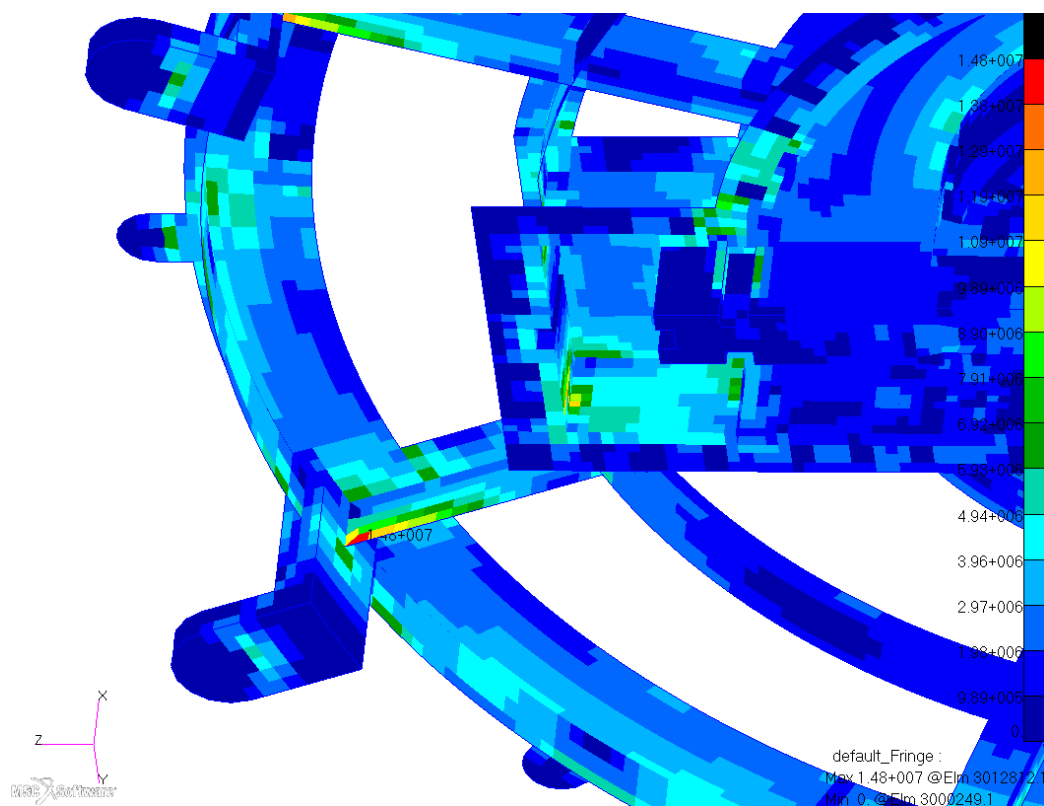


Figura 5.6-27.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Cuasi-estático X (vista general)



**Figura 5.6-28.- Máxima tensión Von Mises (Pa) en Cuasi-estático X
(Vista de detalle)**

5.6.8.-ANALISIS TERMOELASTICO

5.6.8.1.-Condiciones de contorno

La antena UHF está conectada a 8 puntos de interfaz en la parte inferior del cuerpo principal con el panel del satélite, como se muestra en la figura 5.6-29:

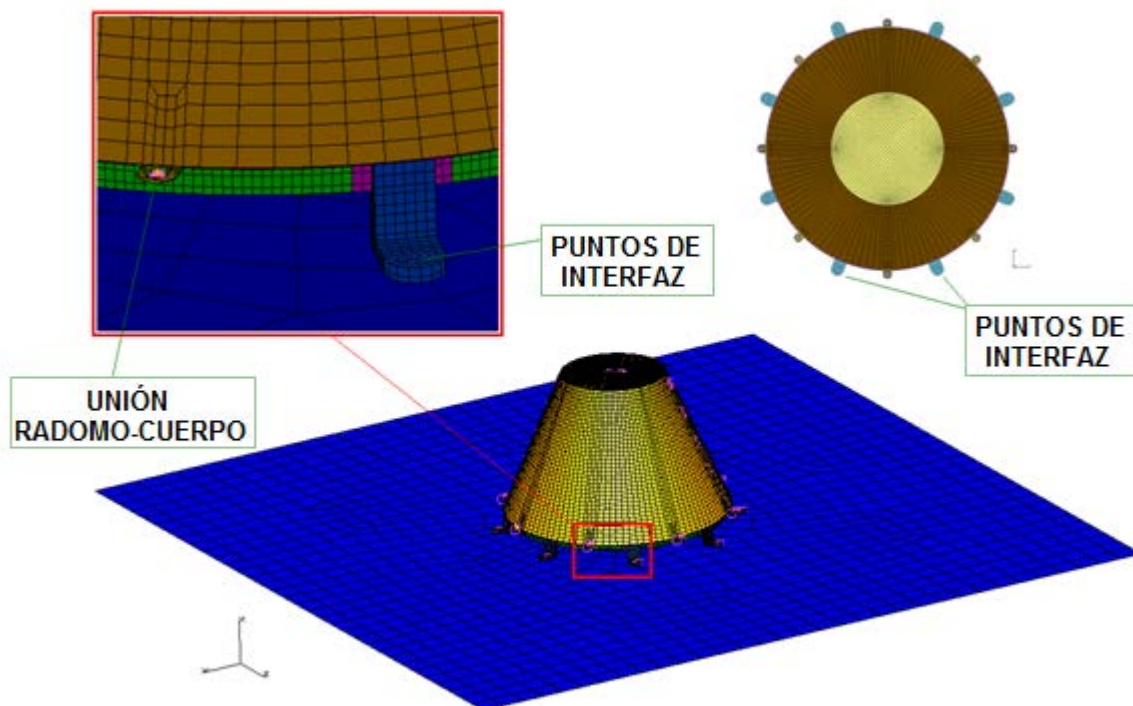


Figura 5.6-29.- Antena UHF sobre el panel del satélite.

El panel del Satélite se ha modelado como una placa de aluminio de espesor de 20 mm.

Se han considerado las siguientes condiciones isostáticas para la fijación de la antena con el panel del satélite.

- 1 esquina del panel con restricciones en X,Y,Z
- 1 esquina del panel con restricciones en X,Y
- 2 esquinas del panel con restricción en X

La unión entre la antena y el satélite está formada por 8 tornillos M5 de titanio. Los tornillos que unen la antena con el panel se simulan por medio de elementos de resorte con el fin de obtener las fuerzas en la interfaz. Todos los grados de libertad, excepto para la rotación alrededor del eje del tornillo, se han restringido en cada punto de interfaz.



Las rigideces consideradas para los elementos de resorte en los puntos de interfaz son las siguientes, extraídas del [DA-4](#):

- Rigidez Traslacional en el plano: $5e^8\text{N/m}$
- Rigidez Traslacional fuera del plano: $3e^8\text{N/m}$
- Rigidez Rotacional en el plano: $3e^3\text{Nm/RAD}$

5.6.8.2.-Cargas térmicas

Han sido estudiados 4 casos de carga termoelástica y 4 análisis de sensibilidad. La tabla 5.6-12 muestra las condiciones de contorno térmicas consideradas para cada caso:

Tabla 5.6-12.- Descripción de los casos termoelásticos.

Caso	Mapa temperaturas	Temp panel (°C)	Comentarios
TE1	T1	+20/+10	10°C de gradiente en el panel en 2 patas diametralmente opuestas
TE2	T2	0/-10	10°C de gradiente en el panel en 2 patas diametralmente opuestas
TE3	T3	0/-10	10°C de gradiente en el panel en 2 patas diametralmente opuestas
TE4	T4	0/-10	10°C de gradiente en el panel en 2 patas diametralmente opuestas
TE1-A	T1	+20	Igual que TE1 pero con la temperatura constante del panel
TE1-B	T1 modif	+20/+10	Igual que TE1 pero con un incremento de la conductividad en la Interfaz de un 40% con respecto a TE1 10°C de gradiente en el panel en 2 patas diametralmente opuestas La temperatura es recalculada para la nueva conductividad
TE1-C	T1	0	Igual que TE1 pero con la temperatura constante del panel
TE4-A	T4	+15/-10	Igual que TE4 10°C de gradiente en el panel en 2 patas diametralmente opuestas

Como se ha descrito en la tabla 5.6-12, los casos de carga sensibilidad (TE1-A-B-C y TE4-A) corresponden a las variaciones de diferentes parámetros (distribución de la temperatura del panel, conductancia de la interfaz) a fin de estudiar su efecto sobre el mapa de distribución de Tensiones.

Teniendo en cuenta que T2 a T4 son los casos transitorios, se han estudiado los peores instantes de esta carga térmica. Para la selección de estos instantes, se han considerado los siguientes criterios:

- Valor máximo de la diferencia: $T_{\max}(\text{radomo}) - T_{\min}(\text{radomo})$
- Valor máximo de la diferencia: $T_{\text{media}}(\text{radomo}) - T_{\text{media}}(\text{balun})$
- Valor máximo de la diferencia: $T_{\text{media}}(\text{Cuerpo principal}) - T_{\text{media}}(\text{S/C panel})$

De acuerdo con los resultados resumidos en [DA-8](#), los casos mostrados en la tabla 5.6-13 han sido considerados para cada carga térmica.

Tabla 5.6-13.- Instantes analizados de los casos de carga transitorios.

Caso de carga termoelástico	Caso de carga térmico	Instante*
TE2	T2	$t = 234371.5s$
TE3	T3	$t = 234371.5s$
TE4	T4	$t = 164581s$

* Los instantes presentados se refieren al inicio de la simulación, esto es, al comienzo de la primera órbita simulada

Las figuras 5.6-30 a 5.6-44 muestran la distribución de la carga térmica para cada caso de carga termoelástica estudiado.

5.6.8.2.1.- TE1: Caso frío

NODE TEMP
TEMPERATURE Scalar Unaveraged Top shell
Min: 1.00E+01 Celsius Max: 2.00E+01 Celsius

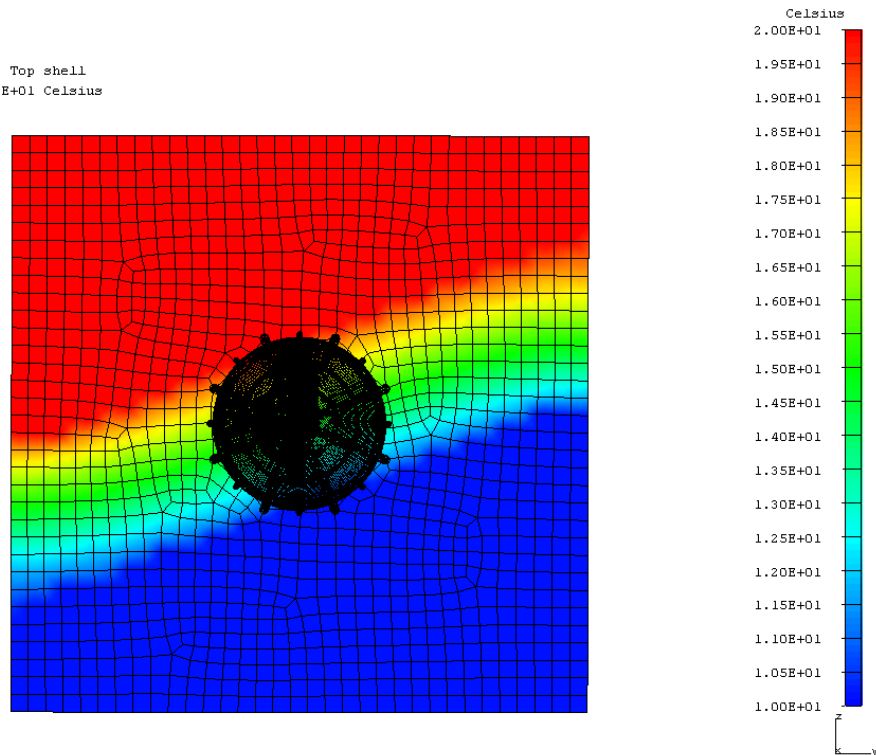


Figura 5.6-30.- TE1. Distribución de temperaturas en el panel.

NODE TEMP
TEMPERATURE Scalar Unaveraged Top shell
Min: -1.17E+02 Celsius Max: -1.10E+02 Celsius

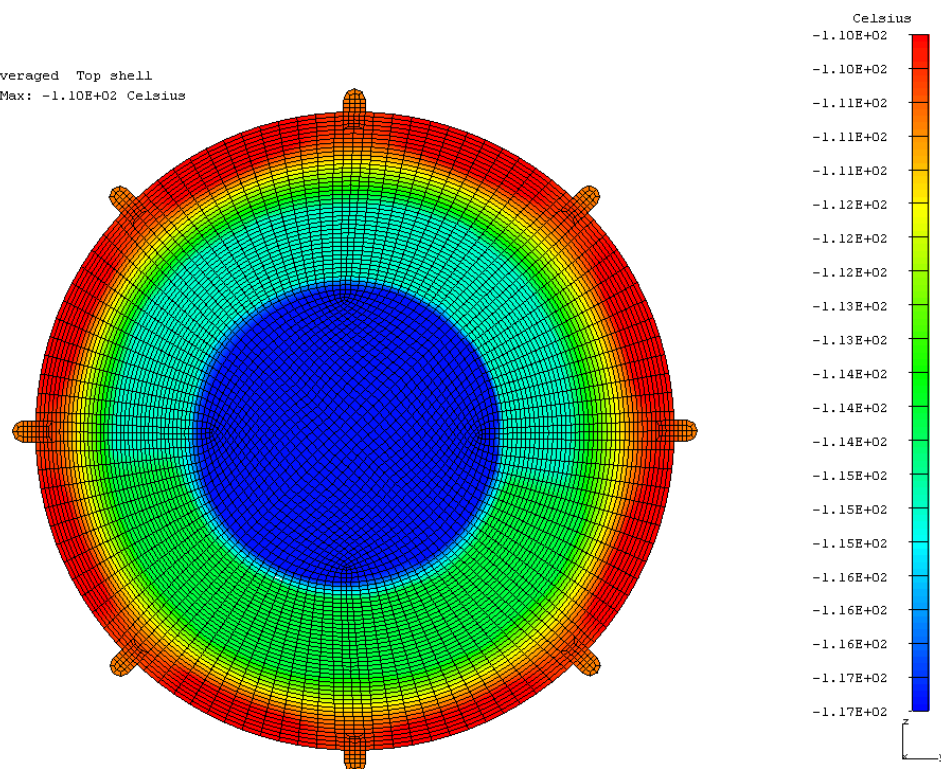


Figura 5.6-31.- TE1. Distribución de temperaturas en el radomo.

NODE TEMP
TEMPERATURE Scalar Unaveraged Top shell
Min: -6.80E+01 Celsius Max: -4.85E+01 Celsius

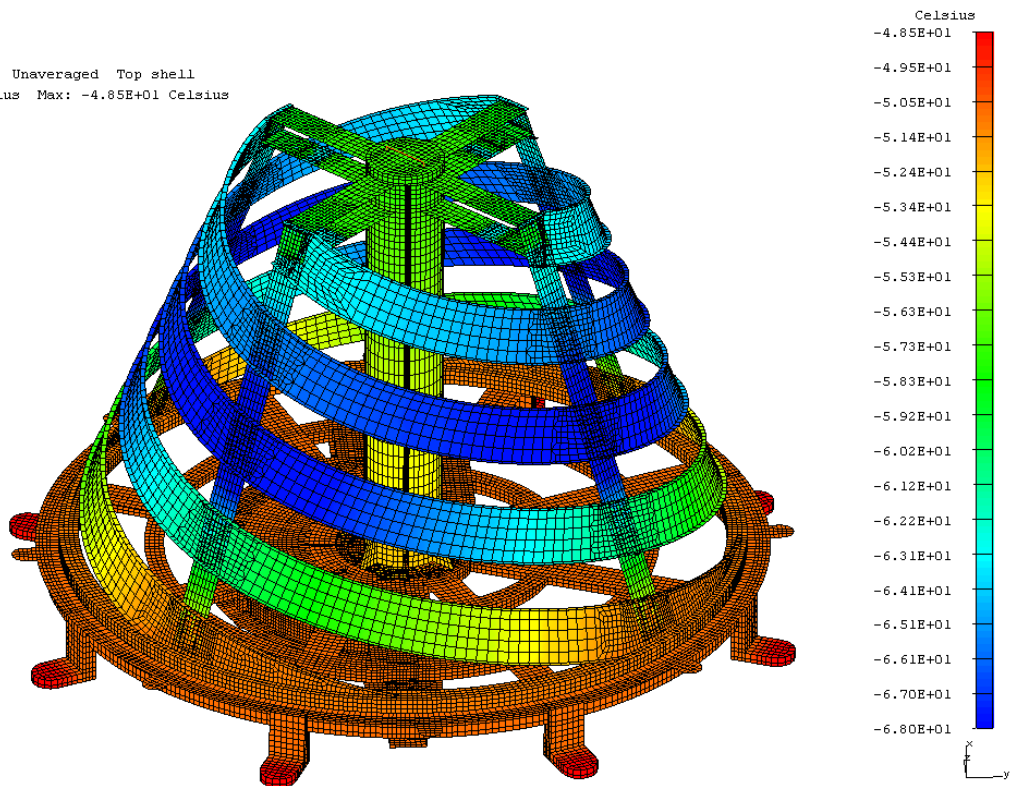


Figura 5.6-32.- TE1. Distribución de temperaturas en la antena.

5.6.8.2.2.- TE2: Caso de “Aerofrenado”

NODE TEMP
TEMPERATURE Scalar Unaveraged Top shell
Min: -1.00E+01 Celsius Max: -6.10E-06 Celsius

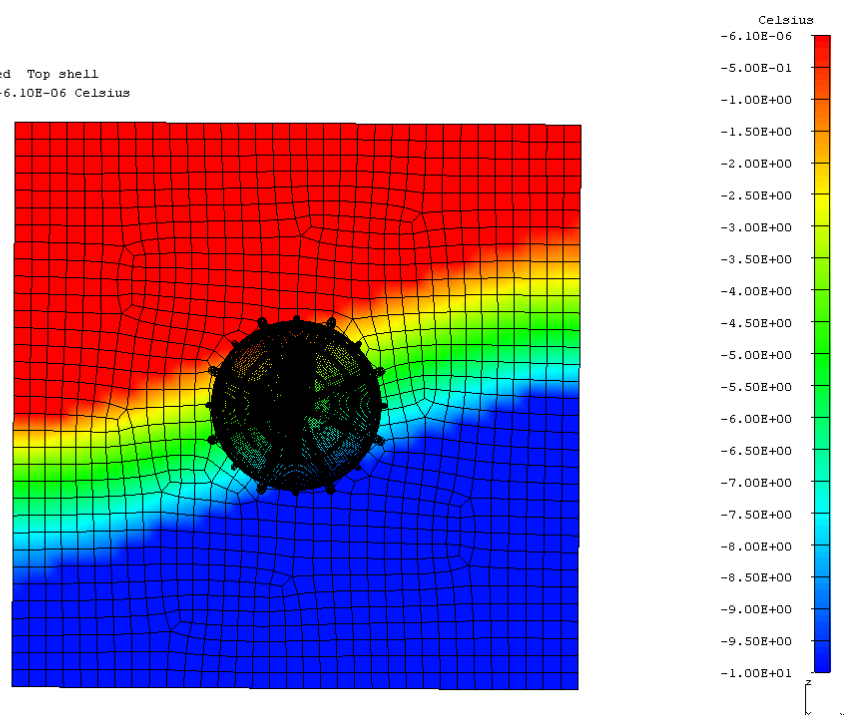


Figura 5.6-33.- TE2. Distribución de temperaturas en el panel.

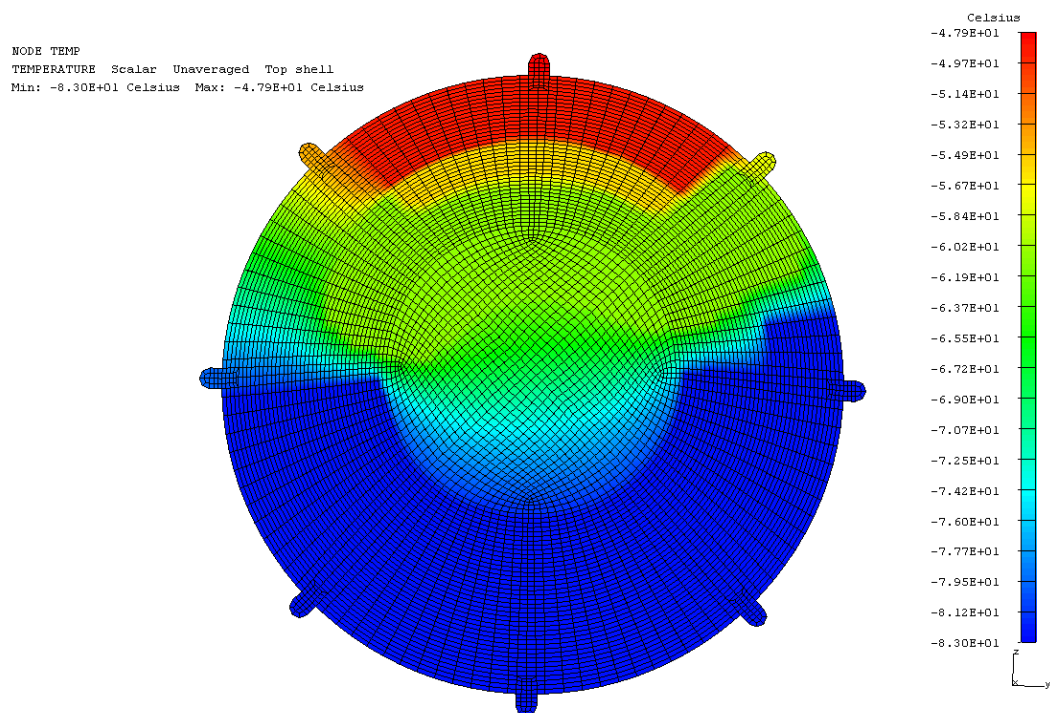


Figura 5.6-34.- TE2. Distribución de temperaturas en el radomo.

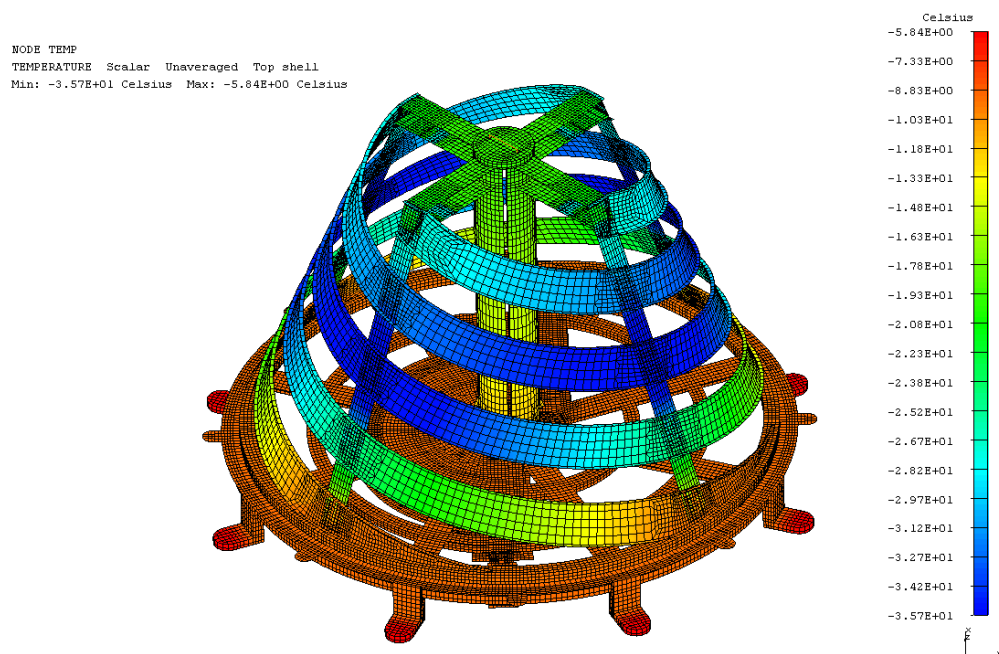


Figura 5.6-35.- TE2. Distribución de temperaturas en la antena.

5.6.8.2.3.- TE3: Caso de contingencia de “aerofrenado” en $-Y$

NODE TEMP
TEMPERATURE Scalar Unaveraged Top shell
Min: $-1.00E+01$ Celsius Max: $-6.10E-06$ Celsius

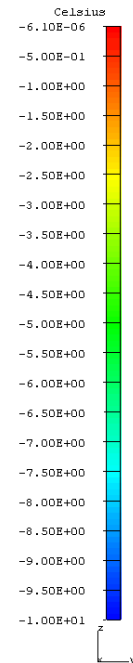
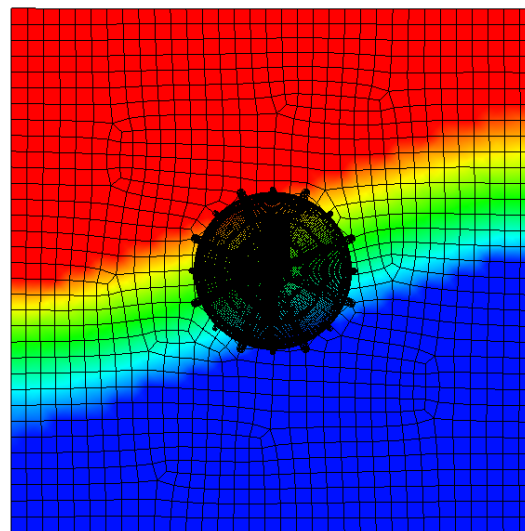


Figura 5.6-36.- TE3.Distribución de temperaturas en el panel.

NODE TEMP
TEMPERATURE Scalar Unaveraged Top shell
Min: $-2.97E+01$ Celsius Max: $-1.85E+01$ Celsius

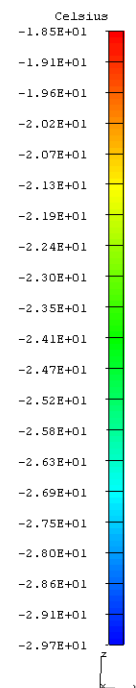
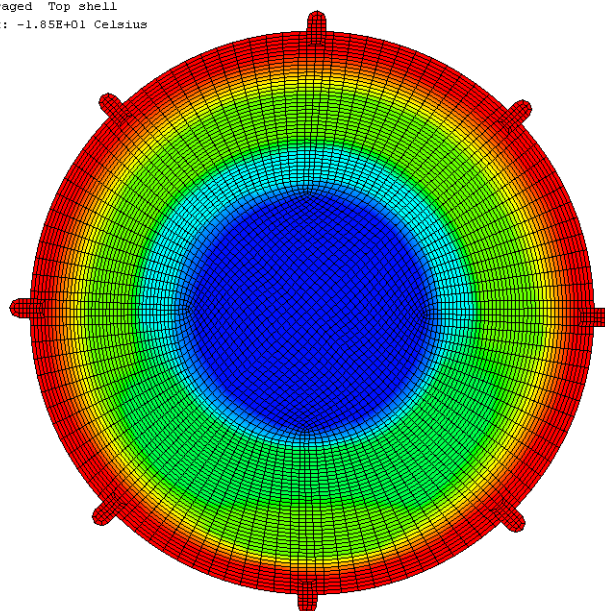


Figura 5.6-37.- TE3. Distribución de temperaturas en el radomo.

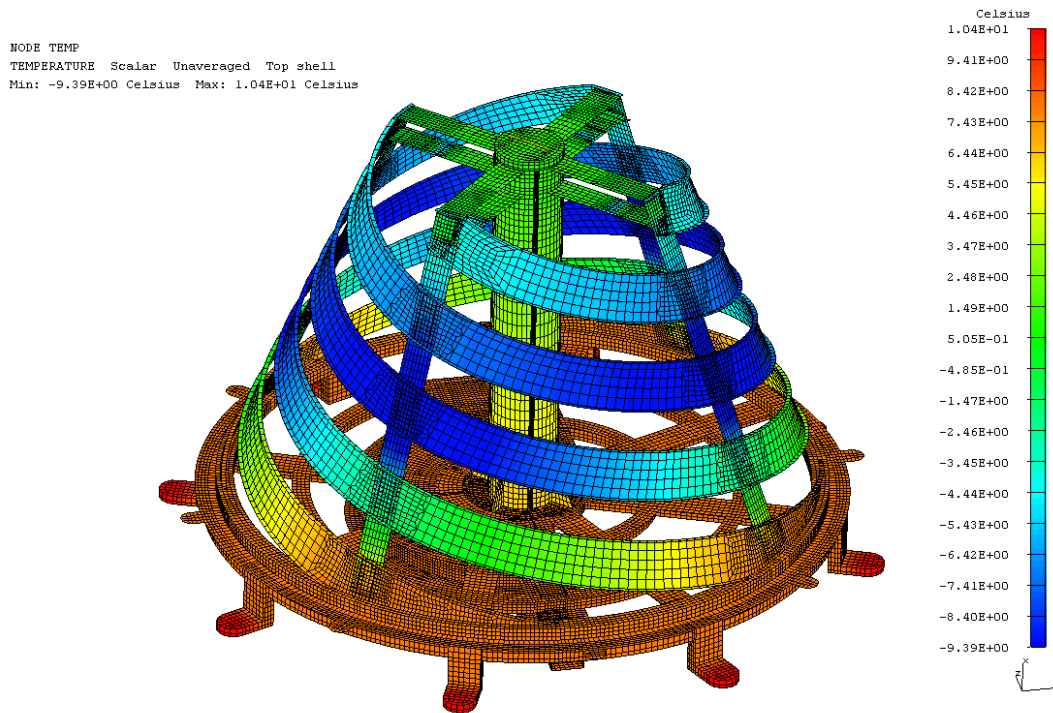


Figura 5.6-38.- TE3.Distribución de temperaturas en la antena.

5.6.8.2.4.- TE4: Caso nominal de “aerofrenado” en -X

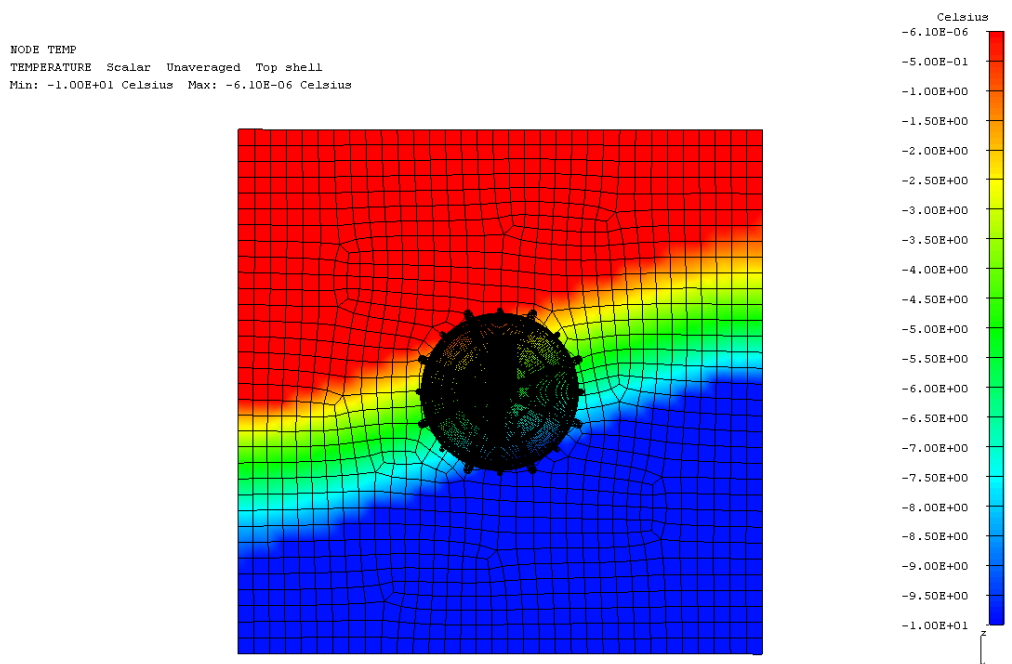


Figura 5.6-39.- TE4.Distribución de temperaturas en el panel.

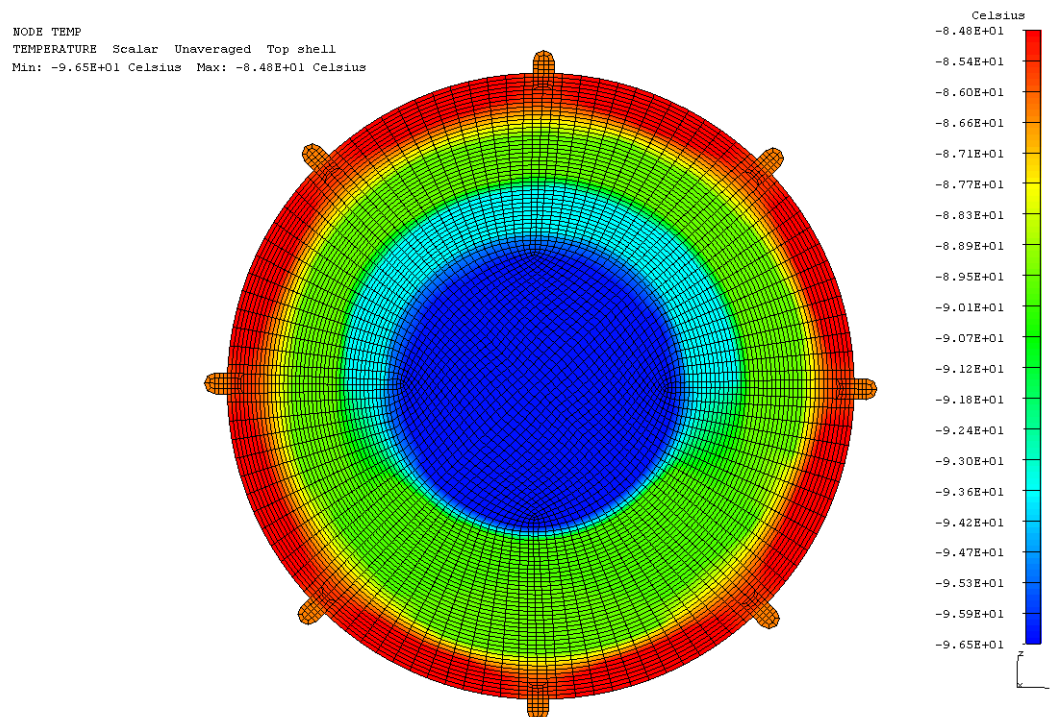


Figura 5.6-40.- TE4.Distribución de temperaturas en el radomo.

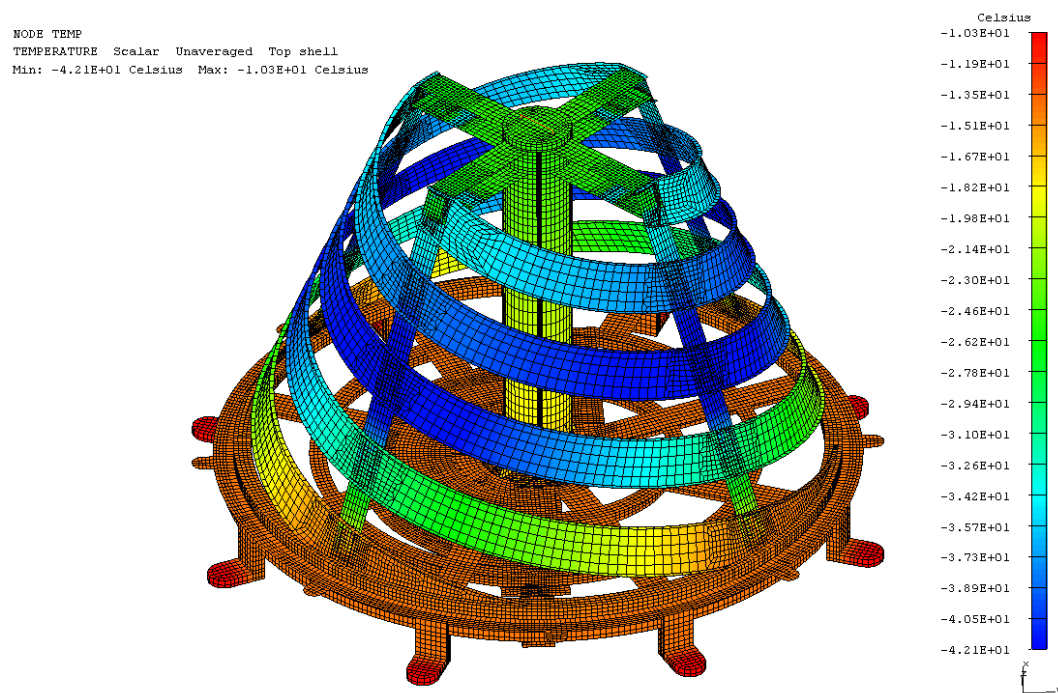


Figura 5.6-41.- TE4.Distribución de temperaturas en la antena.

5.6.8.2.5.- TE1-B: Caso Frío – Análisis de Sensibilidad (Incremento del 40% de la conductancia en los puntos de interfaz)

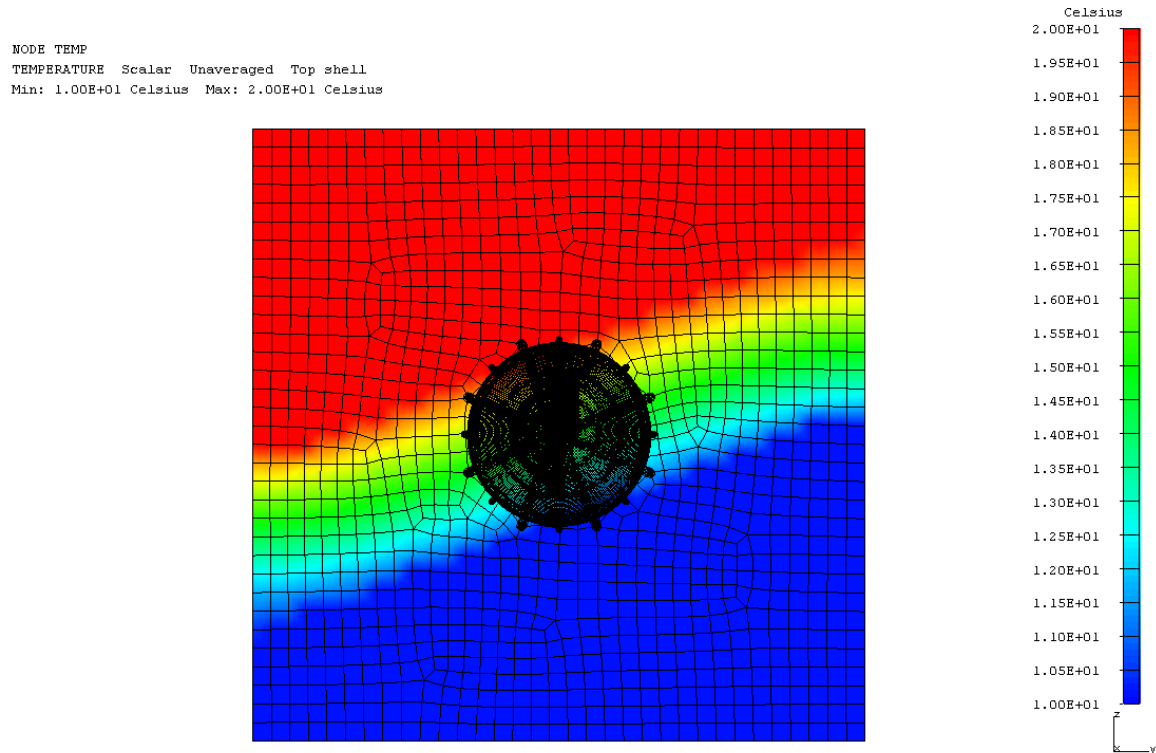


Figura 5.6-42.- TE1-B.Distribución de temperaturas en el panel.

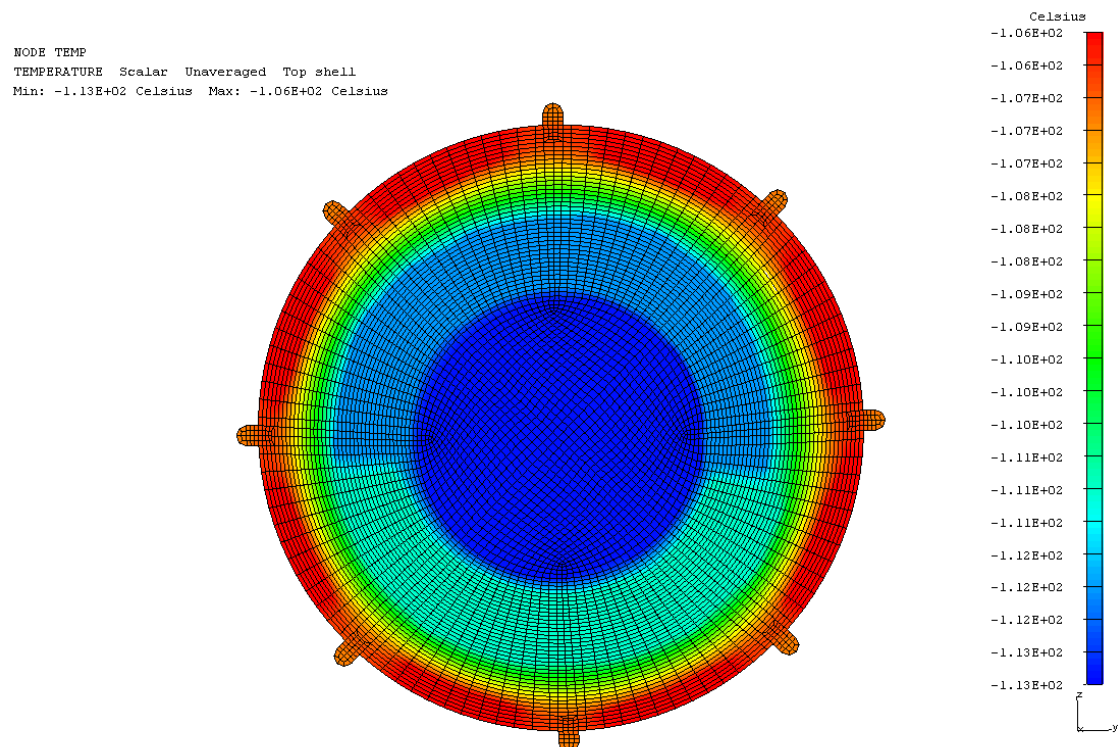


Figura 5.6-43.- TE1-B.Distribución de temperaturas en el radomo.

NODE TEMP
TEMPERATURE Scalar Unaveraged Top shell
Min: -6.33E+01 Celsius Max: -4.18E+01 Celsius

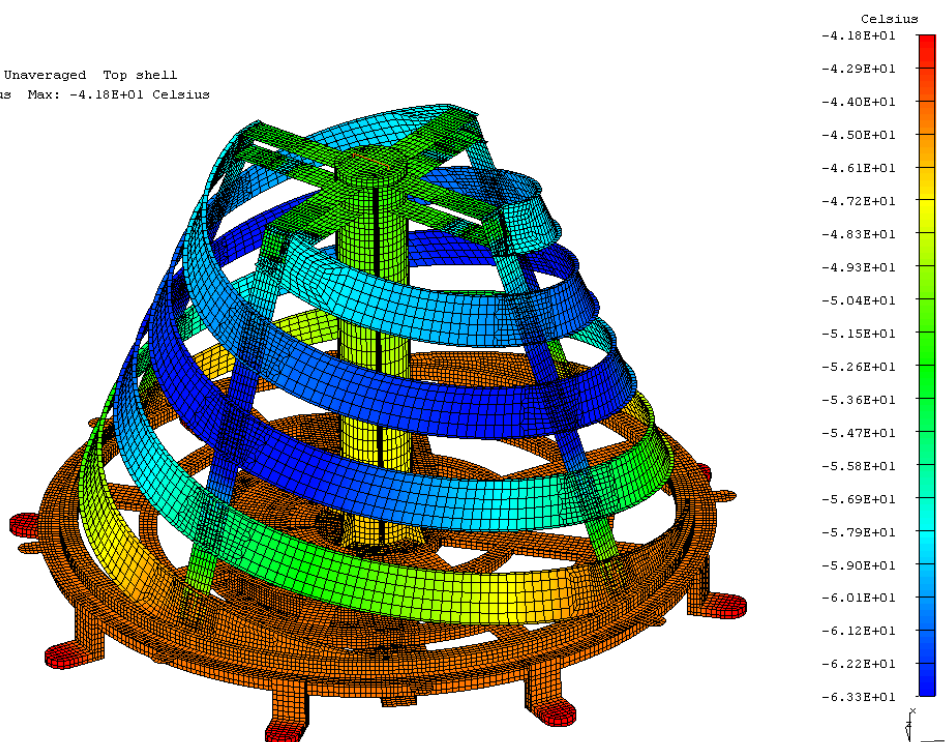


Figura 5.6-44.- TE1-B.Distribución de temperaturas en la antena.

5.6.8.3.-Tensiones máximas

La tabla 5.6-14 muestra el máximo valor de Von Mises y los márgenes de seguridad mínimos obtenidos para cada caso:

Tabla 5.6-14.- Tensiones máximas y márgenes de seguridad

		σ_{VM}	$\sigma_{VM} \cdot FCD$	MS deformación	MS rotura
	Aluminio	107.0	160.56	1.35	1.47
	Fibra de vidrio	49.8	74.76	-	2.75
	Teflón	2.8	4.17	-	3.80
	CuBe2	162.1	243.21	3.70	3.37
	Rexolita	10.9	16.38	-	2.03
	Permaglas	21.6	32.33	-	>5
	Aluminio	57.8	86.75	3.35	3.57
	Fibra de vidrio	15.7	23.60	-	>5
	Teflón	1.2	1.80	-	>5
	CuBe2	83.6	125.33	>5	>5
	Rexolita	5.7	8.57	-	4.79
	Permaglas	17.2	25.80	-	>5
	Aluminio	57.8	86.63	3.36	3.57
	Fibra de vidrio	8.1	12.18	-	>5
	Teflón	0.8	1.23	-	>5
	CuBe2	59.6	89.43	>5	>5
	Rexolita	3.8	5.73	-	>5
	Permaglas	12.7	18.99	-	>5
	Aluminio	57.7	86.57	3.36	3.57
	Fibra de vidrio	19.3	28.95	-	>5
	Teflón	1.3	2.01	-	>5
	CuBe2	95.4	143.13	>5	>5
	Rexolita	6.5	9.81	-	4.06
	Permaglas	20.0	29.97	-	>5
	Aluminio	113.5	170.31	1.22	1.33
	Fibra de vidrio	50.9	76.37	-	2.67
	Teflón	2.8	4.22	-	3.74
	CuBe2	164.5	246.75	3.63	3.31
	Rexolita	10.9	16.35	-	2.03
	Permaglas	22.0	32.96	-	>5

TEI-B	Aluminio	96.7	145.04	1.60	1.73
	Fibra de vidrio	45.2	67.86	-	3.13
	Teflón	2.6	3.84	-	4.21
	CuBe2	150.7	226.02	4.06	3.70
	Rexolita	10.1	15.18	-	2.27
	Permaglas	35.7	53.52	-	2.74
	Aluminio	94.7	142.10	1.66	1.79
	Fibra de vidrio	20.7	31.11	-	>5
	Teflón	1.4	2.09	-	>5
	CuBe2	96.0	144.00	>5	>5
	Rexolita	11.4	17.06	-	1.91
	Permaglas	20.2	30.33	-	>5
	Aluminio	82.6	123.83	2.05	2.20
	Fibra de vidrio	46.8	70.23	-	2.99
	Teflón	2.8	4.13	-	3.85
	CuBe2	157.8	236.70	3.83	3.49
	Rexolita	11.0	16.47	-	2.01
	Permaglas	20.3	30.41	-	>5

Se han aplicado los siguientes factores:

- Factor de seguridad para deformación: 1.1
- Factor de seguridad para rotura: 1.25
- Factor de carga de diseño (FCD): 1.5.

De acuerdo con los resultados enumerados en la tabla 5.6-14, se obtienen las siguientes conclusiones:

- **Máxima tensión Von Mises: 170.3 MPa en Cuerpo Principal en el caso TE1-A.**
- **Mínimo Margen de seguridad: MSD=1.22 y MSR=1.33 en Cuerpo Principal en el caso TE1-A**
- **Todas las tensiones son inferiores a los permisibles de todos los materiales y todos los márgenes positivos, por tanto cumple con los requerimientos especificados para cargas termoelásticas**

En las figuras 5.6-45 a 5.6-47 se muestran las tensiones máximas en la Antena para los

conjuntos de carga termoelástica:

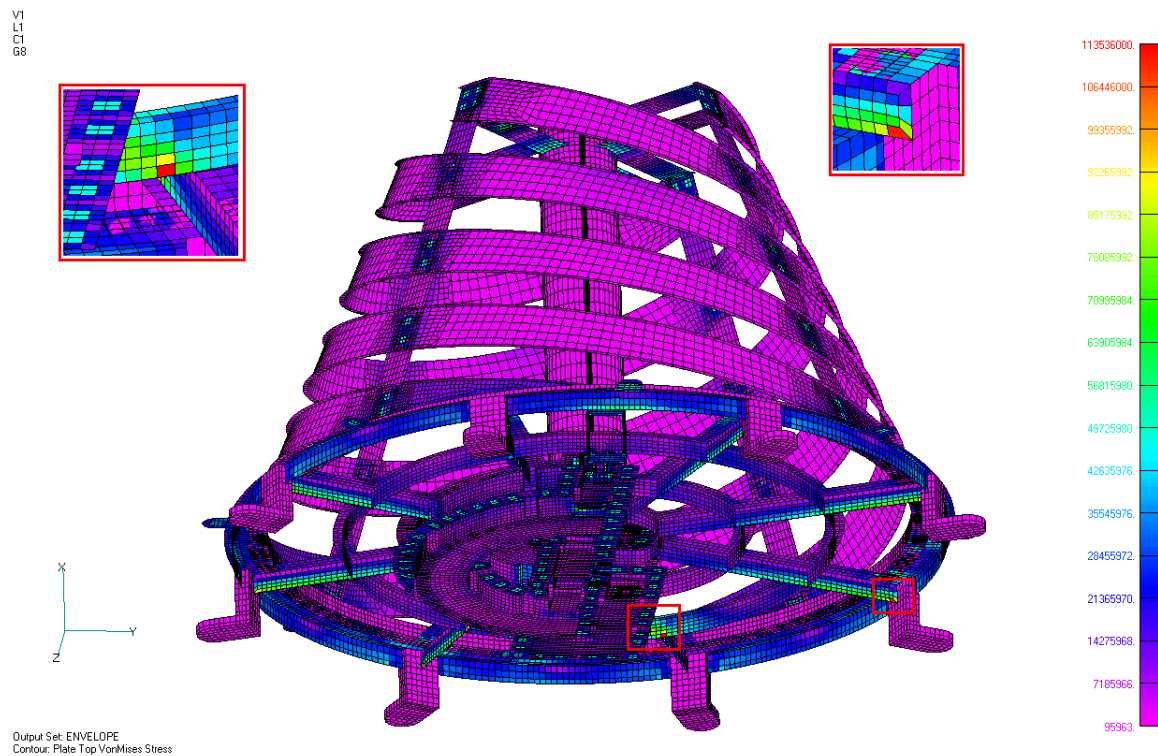


Figura 5.6-45.- Máxima Tensión Von Mises (MPa). Elementos placa sin radomo.
Caso Termoelástico frío TE1-A.

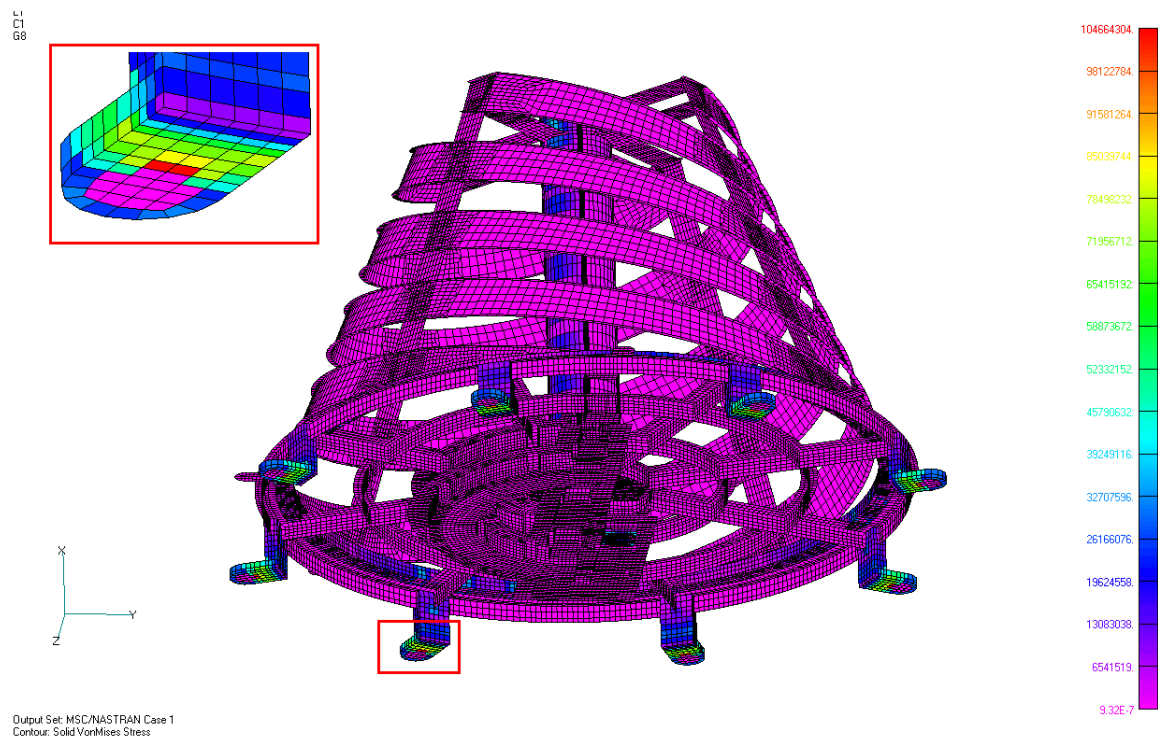


Figura 5.6-46.- Máxima tensión Von Mises (MPa). Elementos sólidos. Caso Termoelástico frío TE1-A.

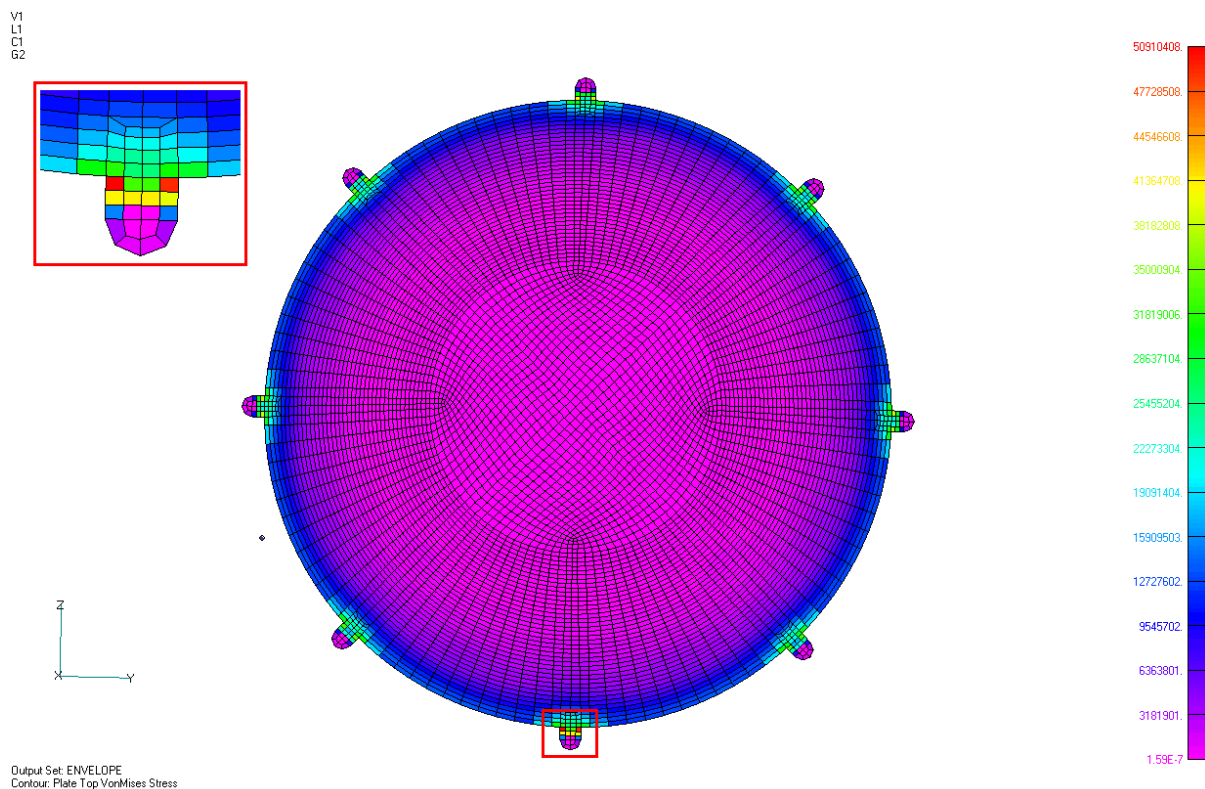


Figura 5.6-47.- Máxima tensión Von Mises (MPa). Radomo. Caso Termoelástico frío TE1-A.

5.6.8.4.-Fuerzas en las uniones

La figura 6.6-48 muestra la numeración utilizada para las uniones atornilladas entre el radomo y el cuerpo principal, y entre la interfaz y el panel del satélite.

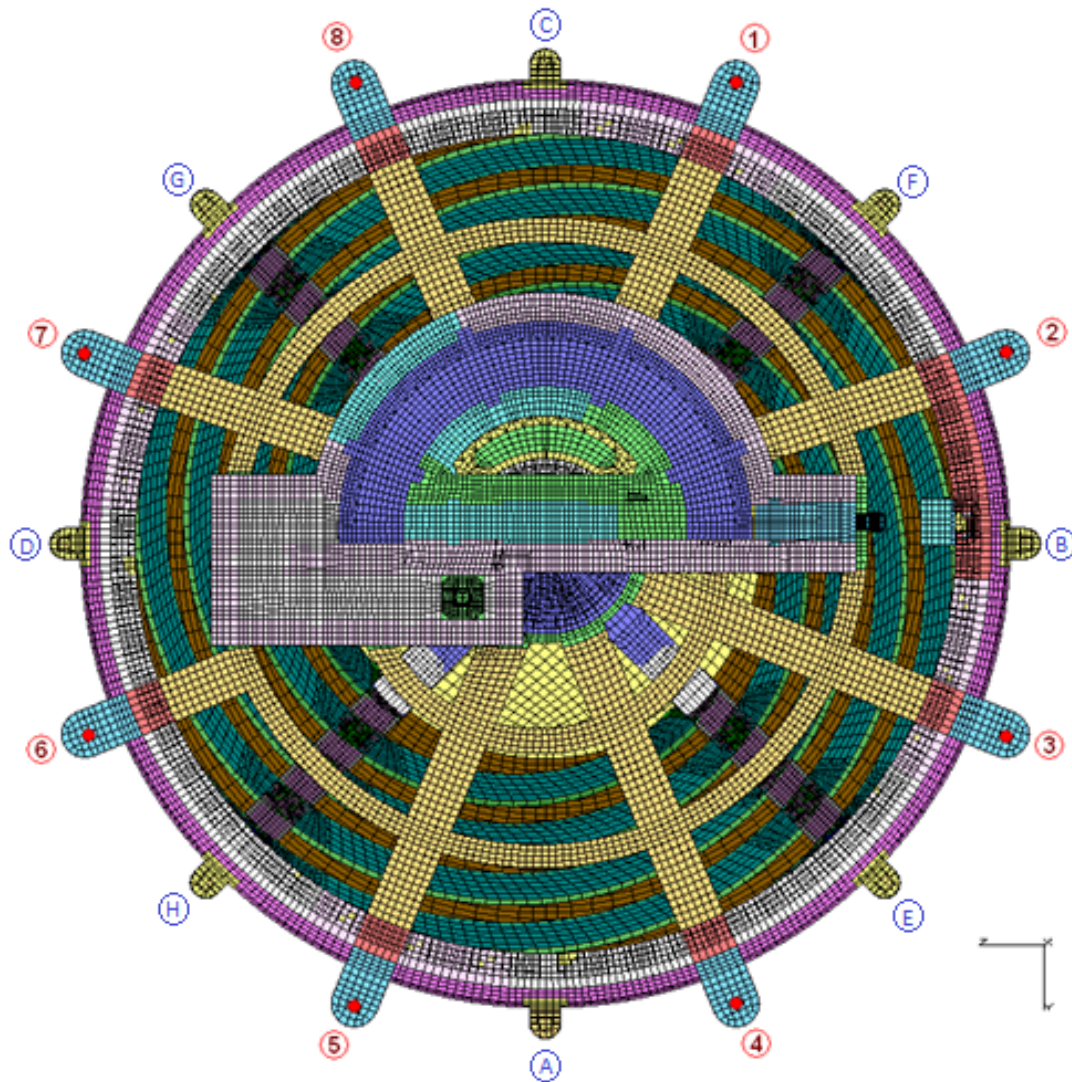


Figura 5.6-48.- Numeración de las uniones.

Las tablas 5.6-15 a 5.6-22 muestran las fuerzas máximas que pasan a través de los tornillos en cada caso:

Tabla 5.6-15.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE1.

TORNILLOS	Faxial (N)	Ftransversal (N)
A	-134.0	6.8
B	-2.7	137.1
C	132.9	4.6
D	-0.3	131.4
E	-96.4	86.8
F	98.8	85.6
G	92.6	91.3
H	-90.9	89.7

PUNTO I/F	Faxial (N)	Ftransversal (N)
1	-4.6	436.0
2	8.7	476.7
3	-7.3	485.2
4	7.2	403.6
5	1.3	475.4
6	-5.7	364.3
7	-4.4	556.8
8	5.0	423.5

Tabla 5.6-16.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE2.

TORNILLOS	Faxial (N)	Ftransversal (N)
A	-52.8	1.1
B	-0.8	57.2
C	52.4	0.2
D	0.4	53.2
E	-35.9	35.8
F	36.8	35.1
G	35.8	36.8
H	-35.9	36.3

PUNTO I/F	Faxial (N)	Ftransversal (N)
1	2.7	33.3
2	-1.6	18.2
3	0.8	13.3
4	0.4	19.8
5	-0.2	32.9
6	-1.1	31.6
7	2.2	51.3
8	-3.2	30.0

Tabla 5.6-17.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE3.

TORNILLOS	Faxial (N)	Ftransversal (N)
A	-32.5	1.4
B	-0.5	37.4
C	32.2	0.9
D	0.6	33.5
E	-20.8	23.0
F	21.7	22.2
G	21.5	23.1
H	-22.1	22.6

PUNTO I/F	Faxial (N)	Ftransversal (N)
1	3.9	44.8
2	-3.3	64.2
3	2.1	68.8
4	-0.7	49.3
5	-0.4	53.4
6	-0.2	27.5
7	3.2	36.2
8	-4.5	42.7

Tabla 5.6-18.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE4.

TORNILLOS	Faxial (N)	Ftransversal (N)	PUNTO I/F	Faxial (N)	Ftransversal (N)
A	-62.2	1.4	1	2.0	63.0
B	-0.9	66.6	2	-0.7	53.4
C	61.7	0.4	3	0.1	50.5
D	0.3	62.4	4	1.0	49.3
E	-42.8	41.8	5	-0.2	65.2
F	43.8	41.1	6	-1.3	57.9
G	42.4	43.1	7	1.6	91.2
H	-42.2	42.6	8	-2.5	60.1

Tabla 5.6-19.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE1-A.

TORNILLOS	Faxial (N)	Ftransversal (N)	PUNTO I/F	Faxial (N)	Ftransversal (N)
A	-134.3	7.0	1	-5.7	468.8
B	-3.0	137.1	2	9.1	522.3
C	133.6	5.4	3	-7.3	542.2
D	-0.3	131.7	4	6.3	440.4
E	-96.9	86.8	5	2.2	513.0
F	99.3	85.5	6	-5.9	384.1
G	93.2	91.7	7	-5.6	579.7
H	-91.7	89.7	8	6.8	451.1

Tabla 5.6-20.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE1-B.

TORNILLOS	Faxial (N)	Ftransversal (N)	PUNTO I/F	Faxial (N)	Ftransversal (N)
A	-121.9	6.1	1	-3.7	394.1
B	-2.6	124.9	2	7.5	428.8
C	120.8	4.1	3	-6.4	436.4
D	-0.2	119.6	4	6.3	363.6
E	-87.5	79.0	5	1.3	429.2
F	89.9	77.8	6	-5.4	329.6
G	84.1	83.2	7	-3.6	504.5
H	-82.7	81.5	8	4.0	382.4

Tabla 5.6-21.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE1-C.

TORNILLOS	Faxial (N)	Ftransversal (N)	PUNTO I/F	Faxial (N)	Ftransversal (N)
A	-132.2	5.4	1	-3.8	337.1
B	-2.1	136.4	2	6.3	374.9
C	131.8	4.0	3	-5.2	390.0
D	-0.6	130.8	4	4.8	316.8
E	-94.6	86.2	5	1.0	367.8
F	96.0	85.7	6	-3.6	278.0
G	91.9	90.6	7	-3.9	416.6
H	-90.2	89.5	8	4.5	324.1

Tabla 5.6-22.- Máximas fuerzas termoelásticas a través de las principales uniones analizadas. TE4-A.

TORNILLOS	Faxial (N)	Ftransversal (N)	PUNTO I/F	Faxial (N)	Ftransversal (N)
A	-63.3	2.4	1	2.2	117.6
B	-1.2	66.9	2	0.8	96.6
C	62.0	0.2	3	-1.5	79.2
D	0.5	62.6	4	3.5	88.6
E	-43.8	42.1	5	-0.7	122.2
F	45.5	41.0	6	-2.8	108.7
G	42.5	43.3	7	2.1	179.1
H	-42.1	42.8	8	-3.5	115.5

Las reacciones en todos los puntos de interfaz son menores que los valores requeridos de 600N para fuerza axial y 1500N para cortante. Por tanto se cumple con los requisitos especificados



5.6.8.5.-Análisis de tornillos

Las uniones analizadas son la unión de interfaz con el satélite y la unión entre el radomo y el cuerpo principal.

Se han calculado las fuerzas que pasan a través de las uniones para todos los casos de carga termoelástica considerados

Debido a la flexibilidad tanto del cuerpo principal como del radomo y a la posibilidad de tener un deslizamiento de uno o algunos tornillos de la unión, las uniones atornilladas se han comprobado tornillo por tornillo.

La precarga de los tornillos se ha incrementado/reducido teniendo en cuenta el efecto de la temperatura y el coeficiente de expansión térmica diferencial entre las piezas a unir y los tornillos usados.

De acuerdo con los resultados enumerados en las tablas 5.6-15 a 5.6-22 las fuerzas máximas a través de los tornillos se obtienen en el caso TE1-A. Además, en el plano las fuerzas son generalmente más altas que fuera del plano. Por lo tanto, los casos fríos serán los casos de carga termoelástica en los que más efecto deberá tener la variación de la precarga debido a los valores relativos de coeficientes termoelásticos.

En las tablas 5.6-23 y 5.6-24 se resumen los tornillos y los datos de las uniones, así como los márgenes de seguridad obtenidos para los modos de fallo de tornillos (deslizamiento, separación, deformación y rotura). Sólo se presenta el peor caso. Los valores presentados de las fuerzas que actúan sobre la unión se han incrementado por el factor de carga (FCD=1,5).

Tabla 5.6-23.- Mínimos márgenes de seguridad para tornillos de IF M5 de titanio. TE1-A.

UNION TORNILLOS INTERFAZ M5 (CASO TE1-A)			
Márgenes de seguridad para los modos de fallo de tornillos			
Margen de seguridad para Deslizamiento		Datos de trabajo	
Fuerza en el plano perpendicular	15.0 [N]	Temperatura de referencia	20.0 [°C]
Fuerza en el plano paralelo	870.0 [N]	Temperatura de trabajo	-17.5 [°C]
Factor de seguridad para deslizamiento	1.25	Precarga perdida en la unión (5%)	-414.8 [N]
Margen de seguridad para deslizamiento	0.13	Cambio de la precarga a la temp. de trabajo	-982.1 [N]
Margen de seguridad para Separación			
Fuerza en el plano perpendicular	15.0 [N]		
Factor de seguridad para separación	1.25		
Margen de seguridad para separación	> 5		
Margen de seguridad para Deformación			
Factor de seguridad para deformación	1.10		
Fuerza en el plano perpendicular	15.0 [N]		
Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS)	540.3 [MPa]		
Factor de seguridad para deformación	0.59		
Margen de seguridad para Rotura			
Factor de seguridad para rotura	1.25		
Fuerza en el plano perpendicular	50.7 [N]		
Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS)	540.4 [MPa]		
Factor de seguridad para rotura	0.72		

**Tabla 5.6-24.- Mínimos márgenes de seguridad para tornillos de la unión
Cuerpo-Radomo M4 de acero. TE1-A.**

UNION CUERPO-RADOMO M4 (CASO TE1-A)

Márgenes de seguridad para los modos de fallo de tornillos

Margen de seguridad para Deslizamiento		
Fuerza en el plano perpendicular	4.5	[N]
Fuerza en el plano paralelo	210.0	[N]
Factor de seguridad para deslizamiento	1.25	
Margen de seguridad para deslizamiento	0.15	

Datos de trabajo		
Temperatura de referencia	20.0	[°C]
Temperatura de trabajo	-80	[°C]
Precarga perdida en la unión (5%)	-64.9	[N]
Cambio de la precarga a la temp. de trabajo	394.2	[N]

Margen de seguridad para Separación		
Fuerza en el plano perpendicular	210.0	[N]
Factor de seguridad para separación	1.25	
Margen de seguridad para separación	> 5	

Margen de seguridad para Deformación		
Factor de seguridad para deformación	1.10	
Fuerza en el plano perpendicular	210.0	[N]
Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS)	355.7	[MPa]
Factor de seguridad para deformación	>5	

Margen de seguridad para Rotura		
Factor de seguridad para rotura	1.25	
Fuerza en el plano perpendicular	50.7	[N]
Tensión de Von Mises en el tornillo (incl. MS)	356.9	[MPa]
Factor de seguridad para rotura	0.96	

Todos los márgenes de seguridad para los modos de fallo de los tornillos son positivos, por lo que cumplen con el criterio especificado.



6.-CONCLUSIONES

- La máxima masa esperada del equipo es 2246g, incluyendo un 8% extra para cubrir incertidumbres (un 5% en el radomo), y está dentro de los 2300g especificados
- Las máximas dimensiones se muestran en la tabla 6-1, y están dentro de las dimensiones especificadas

6-1.-Dimensiones máximas

Dimensiones		
	Antena	Especificación
Sección	Ø 338 mm ²	Ø 350 mm ²
Altura	216.0 mm	220 mm

- El requerimiento de rigidez se cumple: la primera frecuencia natural es 188.1 Hz, que es mayor que los 150HZ especificados
- Una correcta despresurización está garantizada por los orificios de ventilación previstos, ya que la diferencia de presión entre el interior del equipo y el exterior es menor que los 6900Pa/s
- Los márgenes de seguridad, relacionados con los esfuerzos inducidos por las cargas de calificación, son todos positivos, por lo que cumplen con el criterio especificado.
- Los márgenes de seguridad para los modos de fallo de los tornillos son todos positivos, por lo que cumplen con el criterio especificado.

Por lo tanto, gracias a los resultados arrojados por el modelo de elementos finitos sometido a todas las cargas especificadas e incluyendo todos los márgenes de seguridad, podemos tener la certeza de que el equipo resistirá, sin perder prestaciones, toda su vida útil siempre y cuando las condiciones de contorno reales no superen a los casos extremos analizados



7.-DESARROLLOS FUTUROS

Este diseño tendrá un desarrollo futuro inmediato, ya que primero se usará en la misión de prueba del 2016, y a posteriori, con los datos de la misión, y las experiencias recogidas, se implementara con las mejoras oportunas en la misión principal, en la que se pretender llevar un Rover a la superficie de Marte.

El conocimiento y la experiencia adquiridos después de haber realizado este proyecto nos permitirán llevar a cabo proyectos similares o incluso más exigentes en menos tiempo, con menos rediseño y menor incertidumbre, pudiendo centrarnos en la optimización de todos los parámetros requeridos.



8.-BIBLIOGRAFÍA

- DA-1 C. NARDINI / UHF Band Antenna and Radio Frequency Distribution Network Specification / 4-5-2013 / Ed.3 / Ref. EXM-OM-EQP-AF-0745 / *Derechos reservados por THALES*
- DA-2 A.TENORE / Exomars Mechanical Environment and Test Requirements Specification / 20-6-2011 / Ed.6 / Ref. EXM-MS-SSR-AI-0012 / *Derechos reservados por THALES*
- DA-3 A.TENORE, G.POIDOMANI / Exomars Mechanical and Thermal Design and Interface Requirements / 22-10-2010 / Ed.10 / Ref. EXM-MS-SSR-AI-0003 / *Derechos reservados por THALES*
- DA-4 C.DREYER, A.ROCABOY / Exomars Thermal and Thermoelastic input for UHF LGA / 28-08-2013 / Ed.1 / Ref. EXM-OM-SPE-2104 / *Derechos reservados por THALES*
- DA-5 C.MORENO, M.ESTERAS / Interface Control Drawing for UHF Band LGA Antenna / 05-02-2014 / Ed.7 / Ref. EXM-OM-ICD-RYM-0016 / *Derechos reservados por RYMSA*
- DA-6 DEPARTMENT OF DEFENSE U.S.A. / Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures / 1-12-1998 / Ref. MIL-HDBK-5H / *Aprobado para distribución pública*
- DA-7 E.C.S.S. / Data For Selection Of Space Materials and Processes / 18-06-2004 / Ref. ECSS-Q-70-71A / Ed.1 / *Derechos reservados por ECSS*
- DA-8 C.MORENO / Thermal Analysis for Exomars Orbiter UHF LGA & RFDN / 29-10-2013 / Ed.6 / Ref. EXM-OM-DDD-RYM-0041 / *Derechos reservados por RYMSA*